

# 新開発分光器の観測システムの構築と スペクトルカタログの作成

地学・天文学ゼミ

8524 高橋由香里

## 目次

|                     |    |
|---------------------|----|
| 1. 序論               | 3  |
| 1・1 はじめに            |    |
| 1・2 本研究の目的          |    |
| 2. 観測               | 4  |
| 2・1 分光観測について        |    |
| 2・2 観測機器            |    |
| 2・3 観測方法            |    |
| 2・4 実際の観測状況         |    |
| 2・4・1 pirka 望遠鏡での観測 |    |
| 2・4・2 50cm 望遠鏡での観測  |    |
| 2・4・3 観測にあたって       |    |
| 3. 解析               | 36 |
| 3・1 解析方法            |    |
| 3・2 解析手順            |    |
| 4. 結果・考察            | 50 |
| 5. まとめ              | 91 |
| 6. 展望               | 92 |
| 7. 謝辞               | 93 |
| 8. 参考文献             | 94 |

## 1. 序論

### 1・1 はじめに

天体が発する光はさまざまな情報を含んでいる。我々人類はその光をたよりに遠く離れた宇宙で起こる現象について徐々に理解を深めてきた。現在、観測技術・性能の発達によってより詳細な宇宙の姿が分かってきた。一言に天体観測と言っても、天体からやってくる光の各波長によって観測方法も変わり、 $\gamma$ 線～電波まで幅広く観測が行われている。その中で私たちが目にすることができる可視光線の観測はアマチュアのアstronomerも含め、活発に行われている。観測には大きく分けて測光観測・分光観測・偏光観測の3種類があり、それぞれで違う情報を得ることができる。このうち、今回卒論のテーマとして分光観測を取り上げ、データの取得から解析までを行った。

### 1・2 本研究の目的

本研究は新開発の分光器を用いた分光観測システムの構築、及びスペクトルカタログの作成を目的とする。

これまで本学研究室では分光観測を行ってきおらず、今回新しく京都産業大学と共同研究によって開発した分光器を用いた分光観測が初めてとなる。これより分光観測システムの構築を行い、今後発展的に様々な天体の分光が行われるようマニュアル作成に取り組んだ。また、天体のスペクトル型ごとのカタログをつくることで今後の研究に役立つことを期待し、スペクトルカタログ作成にも取り組んだ。

## 2. 観測

### 2・1 分光観測について

分光観測とは分光器を通して天体の光を分け、スペクトルを調べることである。具体的には

- 1) 連続光成分やエネルギー分布の測定
  - 2) 輝線スペクトルの測定
  - 3) 吸収線スペクトルの測定
- を目的としている。

#### ・スペクトル

スペクトルとは波長ごとの光の強度をあらわしたものである。スペクトルには連続スペクトル・輝線スペクトル・吸収線スペクトルがある。

私たちが雨上がりなどに目にする虹は、空気中の水滴がプリズムの役割を果たし、太陽の光が分解されて見える。虹のように広く連続的に分布しているものを連続スペクトルという。一般に、高温の物体が発する光(熱放射による光)は連続スペクトルを示し、スペクトルのエネルギー分布は温度のみに依存する。高温ガスから発せられる光を分光すると何本かの明るい線が見られ、これを輝線スペクトルという。輝線スペクトルは電離あるいは励起された原子のスペクトルや分子の振動・回転遷移によるスペクトルである。

太陽スペクトルにはところどころに暗線があり、これを Fraunhofer 線(吸収線・暗線)という。この暗線が生じるのは太陽表面にあるガスが連続スペクトルの一部の光を選択的に吸収するためである。これらの吸収線や輝線などの線スペクトルは各物質に固有である。

恒星で吸収線スペクトルが現れるのは恒星が発する熱放射による連続スペクトルの上に、恒星の周囲にまわっているガスが発する輝線スペクトルが重なって見えているからである。輝線スペクトルは連続スペクトルよりも暗いため、重なると黒く見え、暗線として見える



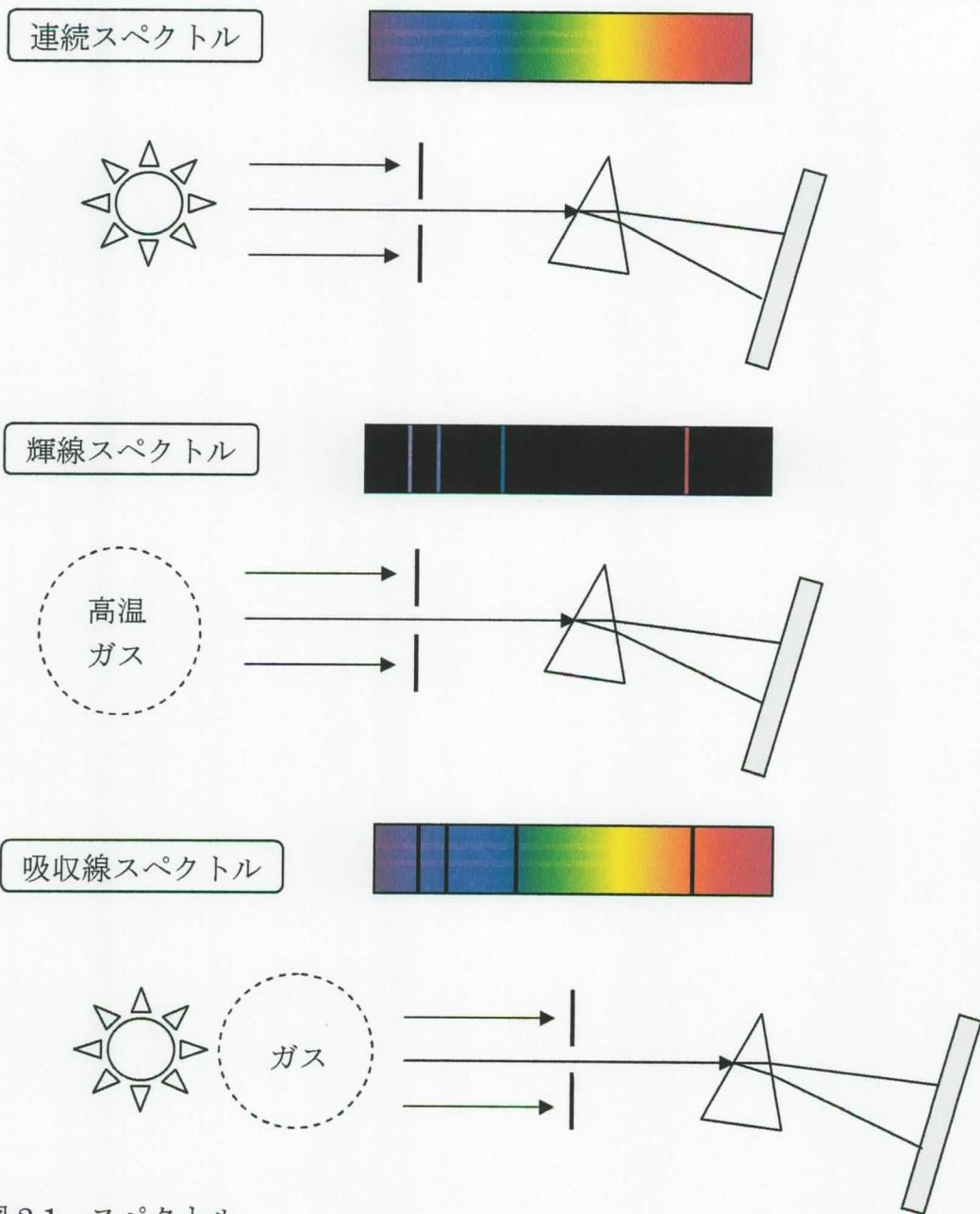


図 2.1 スペクトル

分光観測はプリズムや回折格子などの分散素子を通して天体の光を波長毎に分解して観測する。天体を波長毎に分解するとスペクトルが得られ、スペクトルを調べることでその天体の元素組成や励起状態を知ることができる。つまり、天体を分光することで、その天体を構成している物質や周囲にあるガスの成分や状態を知ることができる。

・天体の放射

天体はさまざまな光(電磁波)を放射している。波長の短いものからγ線, X線, 紫外線, 可視光線, 赤外線, 電波と分けられている。

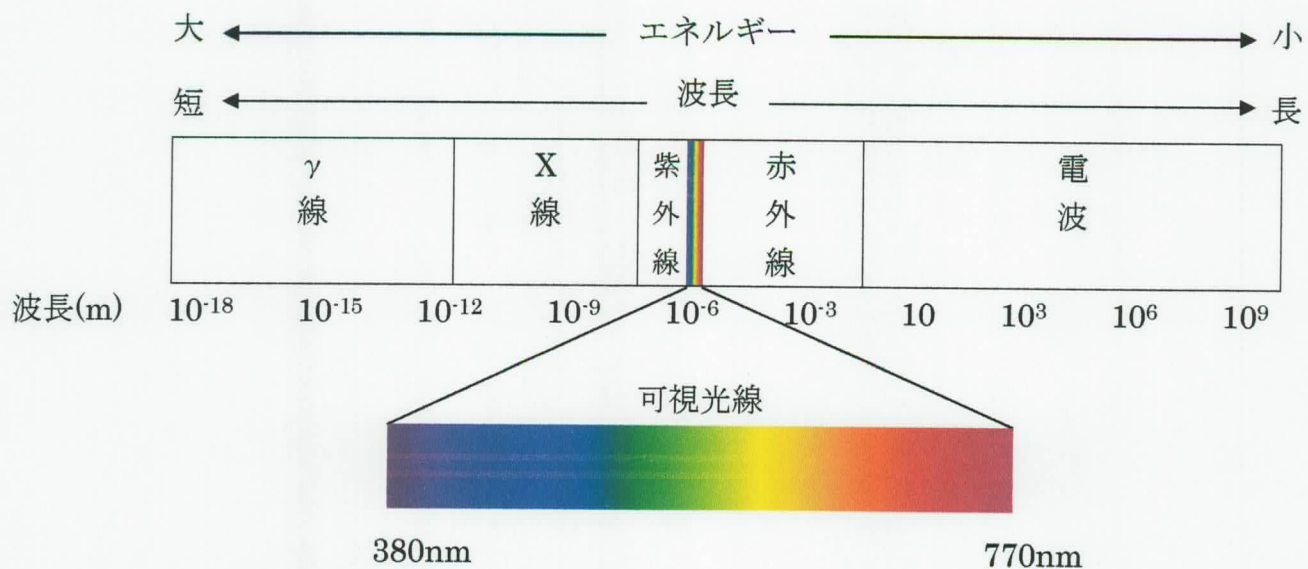


図 2.2 電磁波

- ・ 黒体放射

黒体とはあらゆる光を完全に吸収する理想的な物体をいい、高温の物体が示す連続スペクトルを理想化したものである。

黒体放射はプランク関数に示される。黒体放射は完全な放射なので、同じ温度の現実の物体からの熱放射は黒体放射を超えることはない。

- ・ 恒星の色と温度

恒星の色は表面温度によって決まる。これはウィーンの変位則で示される。

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2.90 \times 10^{-3}(\text{m})$$

表面温度によって放射エネルギーのピークが決まり、温度が低くなるほどピークは右にずれていく。つまり、温度が高い恒星は青っぽく、温度が低くなるほど赤っぽい色を示すようになる。

太陽で計算してみると、太陽の表面温度は 5777K(※理科年表)であるのでおよそ  $\lambda_{\max} = 500\text{nm}$  である。

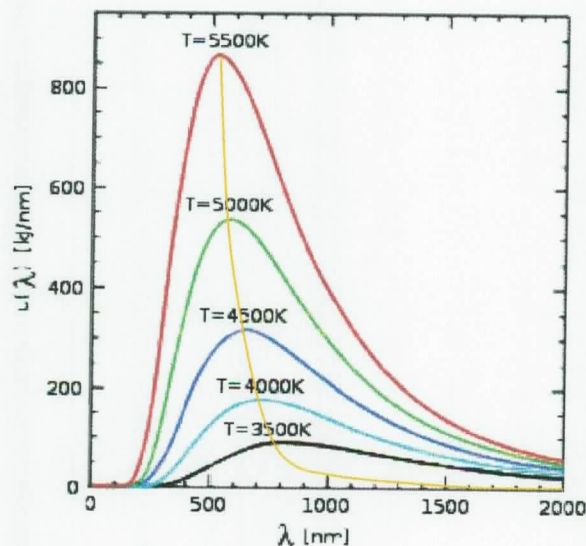


図 2.4 ウィーンの変位則

[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a2/Wiens\\_law.svg/](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a2/Wiens_law.svg/)

## ・スペクトル型分類

### ハーバード式分類法

恒星はそのスペクトルに現れる吸収線のパターンごとに分類される。吸収線は恒星表面の大気の科学組成や温度によって現れ方が異なる。現在最も普通に使われるスペクトル型はハーバード式分類法によって分けられている。ハーバード式分類法はスペクトル線の種類および強さによって O・B・A・F・G・K・M の型に分けられる。スペクトル型の実際の変化は連続的であるためさらに 10 等分して 0~9 までの数字をつけて表される。M 以下にも L・T と続き、さらに枝別れして分類されている。これは温度が低くなると表面温度だけでなく構成物質によっても吸収線のパターンが変化するためである。また、O 型より高温の恒星のスペクトル型として WO 型(ウォルフ・ライエ星)がある。

| スペクトル型 | 表面温度(K)     | 色 | 代表的な恒星             |
|--------|-------------|---|--------------------|
| O 型    | 28000~50000 | 青 | とも座ζ (05Iaf)       |
| B 型    | 10000~28000 | ↓ | リゲル(B8Iae)         |
| A 型    | 7500~10000  | 白 | ベガ(A0Va)           |
| F 型    | 6000~7500   | ↓ | プロキオン(F5IV)        |
| G 型    | 5000~6000   | 黄 | 太陽(G2V)            |
| K 型    | 3500~5000   | ↓ | アークトゥルス(K1IIIb)    |
| M 型    | 2500~3500   | 赤 | ベテルギウス(M1・2Ia-Iab) |

表 2.1 スペクトル型と表面温度

### ヤーキス式分類法(光度階級による分類)

スペクトル型が同じ恒星でも光度階級により線スペクトルの強度や線幅が異なる。絶対等級の階級を表す以下のローマ数字をスペクトル型の後につける。

- I : 超巨星
- II : 輝巨星
- III : 巨星
- IV : 準巨星
- V : 主系列星
- VI : 準矮星
- VII : 白色矮星

(a : より明るい b : より暗い をつけてさらに細分するか、2 つの階級記号をハイフンでつないで中間を表す。その他にも細かい分類記号が存在するが割愛する。)

※引用元 : H24 理科年表 国立天文台編



・HR図(ヘルツシュプルング・ラッセル図)

縦軸に絶対等級、横軸にスペクトル型をとった図。

右上は主に赤色巨星、左上から右下に連なっているのは主系列星、左下は白色矮星が位置している。主系列星は HR 図上で左上に位置するほど質量が大きい恒星ということになる。

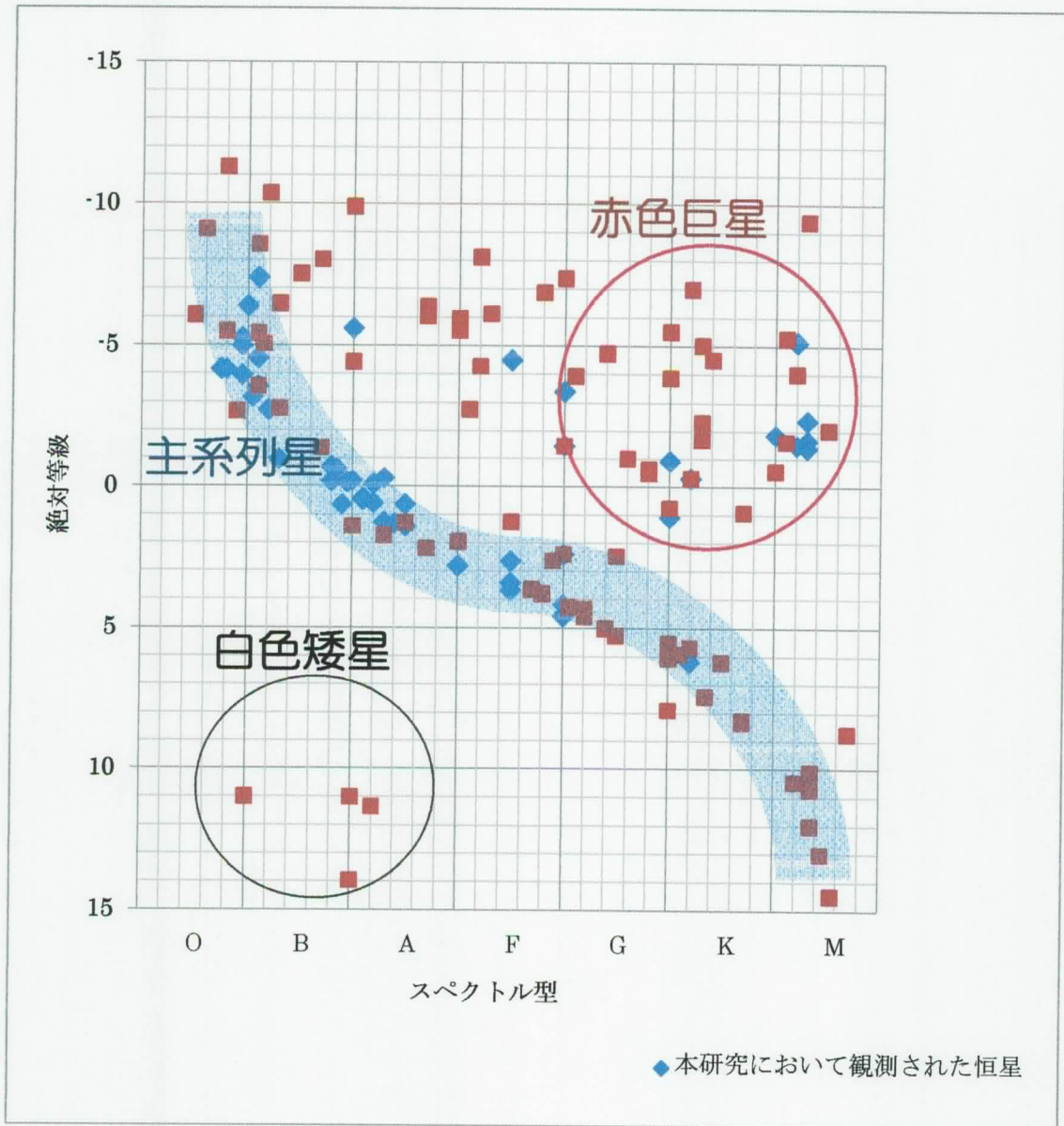
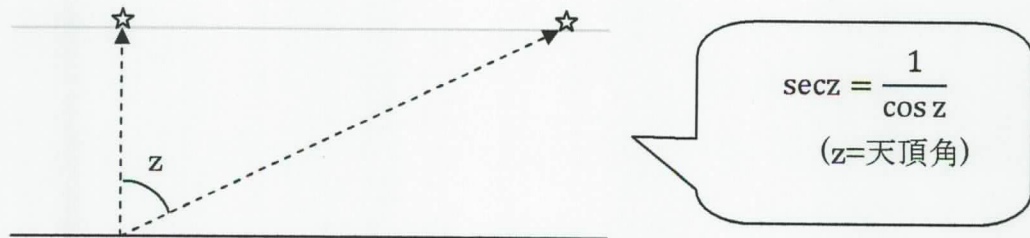


図 2.5 HR 図

- airmass

天体の光は大気を通ることで減光されてしまう。高度が低くなるほど大気の厚みが増し、大気減光は強くなる。大気の厚みはエアマス(airmass)と呼ばれる。



天頂角  $60^\circ$  の時、エアマスは2になる。

実際は地球は球面であり、大気の分布はそれに沿った球殻であるため天頂角が大きい場合には補正項が必要

$$X = \sec(z) - (1.8167\Delta + 2.875\Delta^2 + 0.8083\Delta^3) \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta = \sec(z) - 1$$

- 望遠鏡の原理

光学望遠鏡は主に屈折式と反射式に分類される。望遠鏡を載せる架台は赤道儀式と経緯台式がある。今回使用した望遠鏡のうち、50cm 望遠鏡は赤道儀、pirka 望遠鏡は経緯台である。

今回観測では 1.6m pirka 望遠鏡のカセグレンインターフェースに分光器を取り付けた。カセグレンは反射型のひとつである。

- 分光器の原理

望遠鏡によって集光された光が分光器のコリメーターレンズによって平行光に戻され、カメラレンズによって収束光になり像を結んでいる。コリメーターレンズとカメラレンズの間には分散素子として回折格子が入っている。プリズムは分散が一般でない(短波長が長波長より大きく分散してしまう)ため、回折格子の分光器が一般的である。望遠鏡によって集光された天体の光のうち、スリットを通った部分は回折格子に通され、それ以外の部分はスリットビューアーへと通される。これによりスリットビューアーを見ることで天体が視野のどこにいるかを把握し、スリット上に乗せることができる。スリットを通った光は回折格子によって分散され、スペクトルとして現れる。

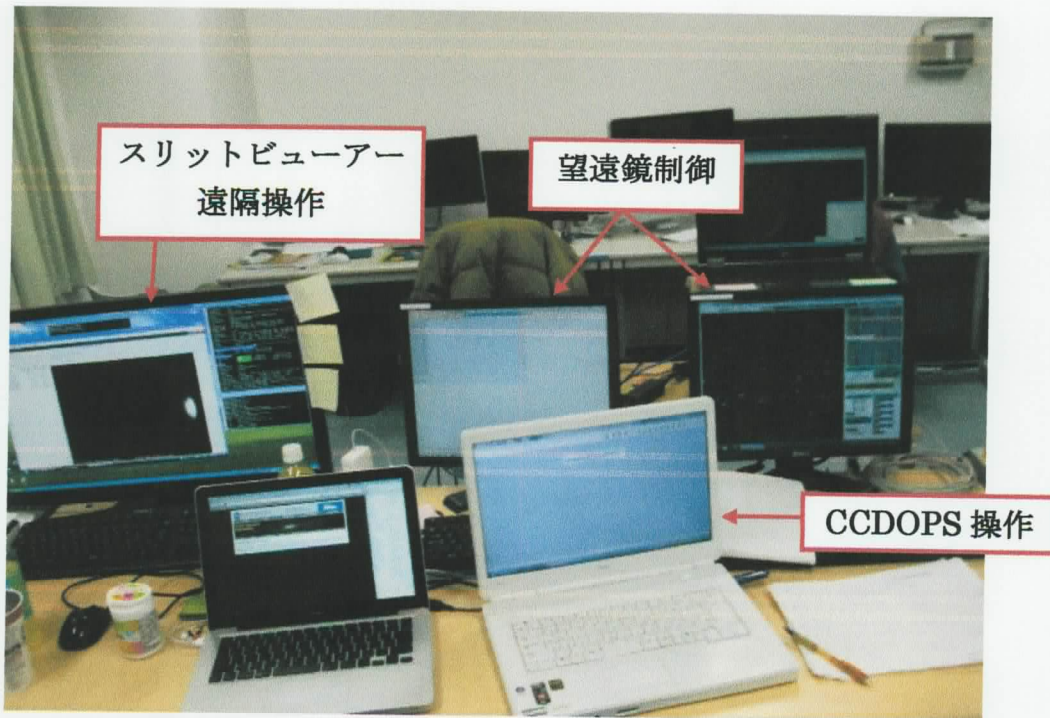


図 2.6 操作室の様子

PC1 で CCDOPS を使って CCD カメラを操作する。PC2 を watec の CCD カメラにつなぎ、操作室のパソコンに画面を飛ばして遠隔操作する。Pirka 望遠鏡は 2 台のパソコンを使って制御・操作する。

・回折格子の原理

回折格子は光の回折と干渉を利用して分光する光学素子である。グレーティング(grating)とも呼ばれる。ガラス板の表面 1cm 当たり数百本~数千本の割合で溝を等間隔に刻んであり、それがスリットの役割を果たし、分光される。。

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (m=0,1,2,\dots)$$



・分光器(低分散可視光分光器)

|       |                     |
|-------|---------------------|
| 分散素子  | 反射型回折格子<br>600 本/mm |
| 観測波長域 | 4800~9200 Å         |
| 波長分解能 | $R > 300$           |

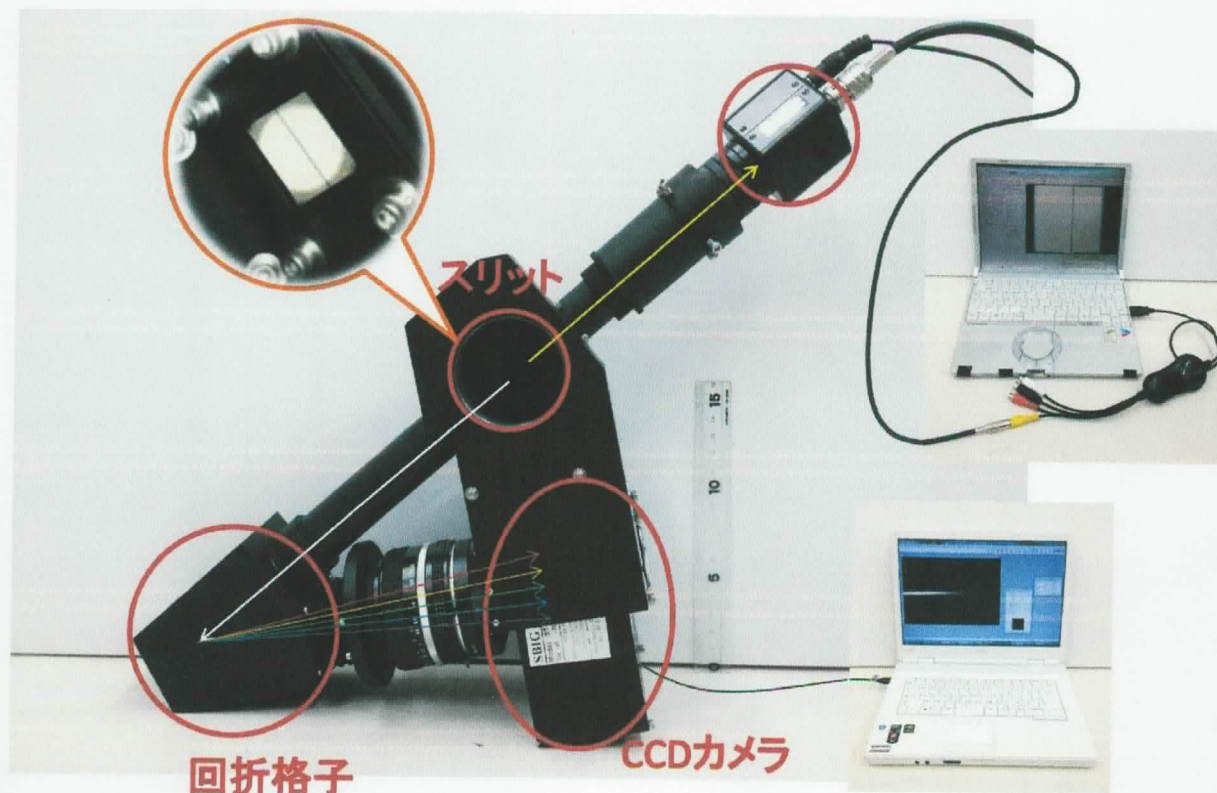


図 2.7 分光器の原理

スリット以外に入った光は小型 CCD カメラを取り付けたスリットビューアーで確認することができる。スリット部分に入った光は回折格子によって光を分けられ、スペクトルとして CCD カメラに出力される。



検出器：ST-402ME

SBIG 社製の冷却 CCD(Charge Coupled Device：電荷結合素子)

CCD とは画素(ピクセル)と呼ばれる小さな受光面からなり、この受光面に当たった光子は電子に変換される。読み出された電子は変換されて画像として表示される。

|        |                           |
|--------|---------------------------|
| 画素数    | 765×510 画素<br>(6.9×4.6mm) |
| 冷却能力   | 外気温より - 25～ - 30℃         |
| 視野角    | 1.8540"                   |
| 露出時間   | 0.04～3600 秒               |
| 転送時間   | 約 0.49 秒                  |
| 重量     | 780g                      |
| 制御ソフト  | CCDOPS                    |
| 操作システム | デバイスサーバー                  |



図 2.8 CCD カメラ(ST-402ME)

スリットビューアー：WAT-120N

Watec 社製の小型 CCD カメラ。天体観測向けであり、超高感度。リモコンによりシャッタースピードを変更することができる。目標天体によって変更するとよい。シャッタースピードとゲインを最大にすると、pirka 望遠鏡ではおよそ 13 等までスリットビューアーで捉えることができる。

|           |                           |
|-----------|---------------------------|
| シャッタースピード | 1/60s ~ 256f(8.5s)        |
| 重量        | CCD…約 150g<br>リモコン…約 210g |
| 有効画素数     | 768×494 画素                |
| 動作温度      | -10 ~ +40℃                |
| 制御ソフト     | UFO Capture               |



図 2.9 WAT-120N+

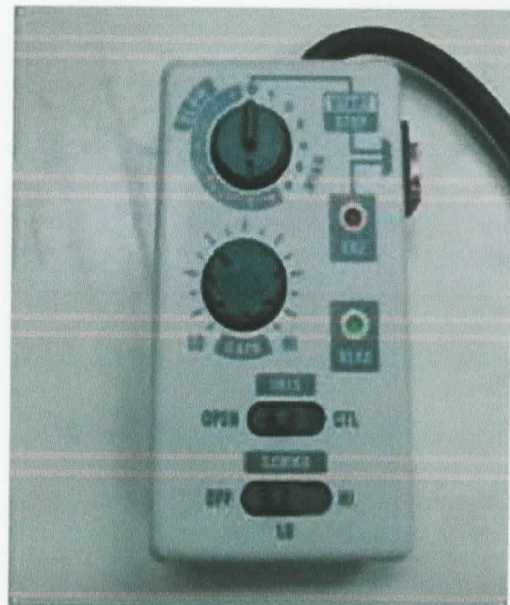


図 2.10 リモコン

スリットビューアーは今回の観測では流星観測で用いている SonotaCo の UFO Capture をビデオキャプチャーとして使用した。

<http://sonotaco.com/soft/index.html>

キャプチャーデバイスは I・O DATA の GV-USB を使用した。

1.6m で観測を行う場合、ドーム内に光源となるものを置くのを避けるために、CCD 類はすべて遠隔操作とした。(始めは同軸ケーブルのはんだ付けがうまくいかなかったせいか、接触が悪く操作室内でスリットビューワーが見られなかったので、やむを得ずドーム内にパソコンを置いていちいち確認しに行っていた。) CCDOPS の操作は BAFFARO の有線 LAN 機、LDH-2UH で遠隔操作を行った。これは有線 LAN をつないでデバイスサーバーを設定することで使うことができる。

また、スリットビューアー用のパソコンは Tight VNC をインストールして操作室内のパソコンにドーム内に置いたパソコンの画面を飛ばして操作した。

<http://www.tightvnc.com/download.php>

天体をスリットビューアーでスリット上に乗ったことを確認し、撮影すると天体のスペクトルが得られる。このスペクトル画像は横軸が波長方向に分散された光であり、縦軸は空間位置(スリット上のどこに捉えているか)である。

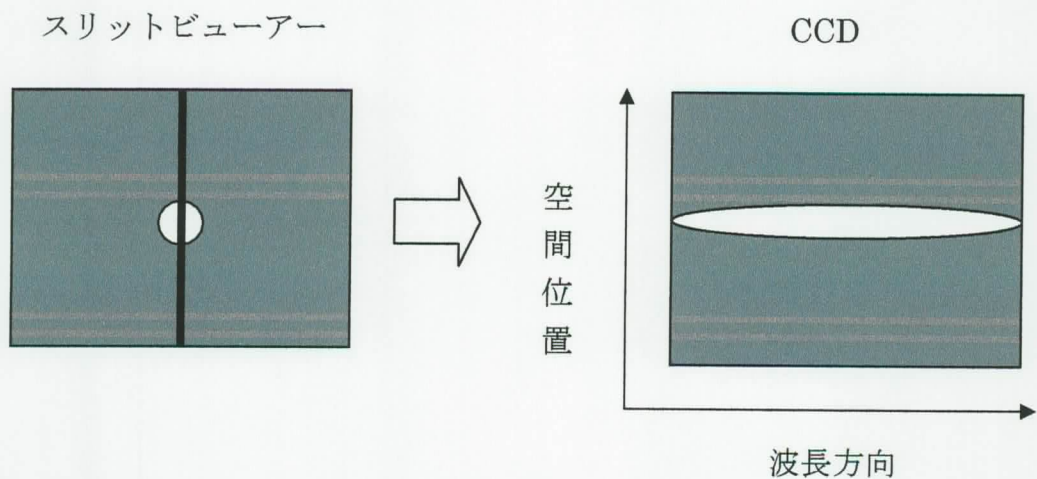


図 2.11 スリットビューアーと CCD 画像



## 2・3 観測地

なよろ市立天文台 きたすばる

(北緯：44.22.27 東経：142.28.59 標高：151m)

きたすばるには4台の望遠鏡が設置されている。10m ドームには北海道大学が設置した口径1.6mの大型望遠鏡ピリカがある。



図 2.12 なよろ市立天文台

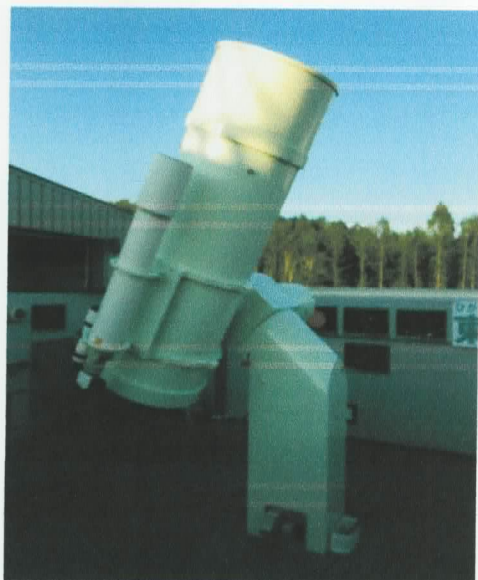
画像右側にあるドームにピリカ望遠鏡が設置されている。

## 2-4 観測方法

前述した観測機器を望遠鏡に取り付け観測を行う。

今回なよろ市立天文台にある 50cm 望遠鏡と北大所有の 1.6m pirka 望遠鏡を使用した。

### ・ 50cm 望遠鏡



|      |           |
|------|-----------|
| 口径   | 50cm      |
| 焦点距離 | 4750mm    |
| F 値  | 9.5       |
| 製造元  | takahashi |

50cm 望遠鏡に分光器を取り付けた場合、スリット幅はおよそ 5 秒角となり、効率よく天体の光を集めることができる。

図 2.13 50cm 望遠鏡

観測の際は THE SKY Ver.6 で望遠鏡を制御する。

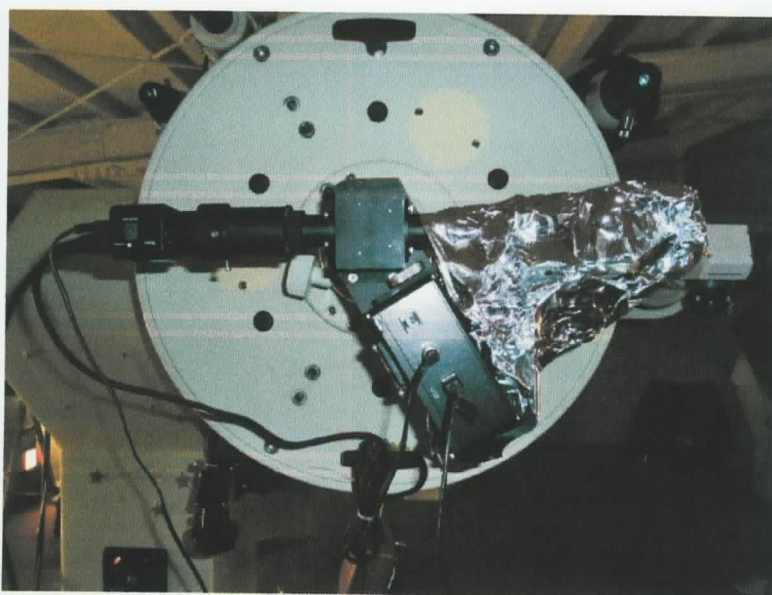


図 2.14 50cm 望遠鏡に取り付けた様子

アルミホイルを巻いて周囲からの漏れ光を防いでいる。

・ 1.6m 大型望遠鏡 pirka

公開天文台としては国内 2 番目の大きさを誇る。北海道大学が設置し、研究観測に使用している。週末は一般公開が行われているため、その時間は研究に使用することはできない。

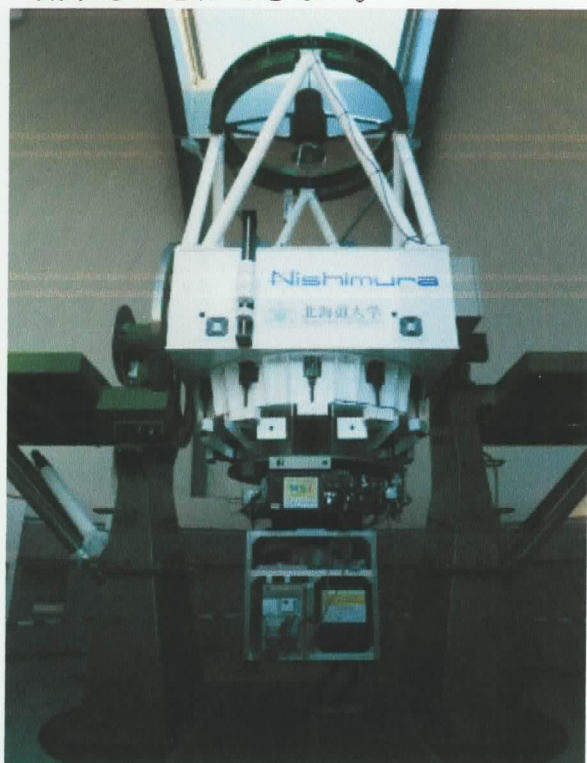


図 2.15 pirka 望遠鏡

|      |           |
|------|-----------|
| 口径   | 1600mm    |
| 焦点距離 | 19200mm   |
| F 値  | 12        |
| 製造元  | nishimura |

1.6m 望遠鏡の場合、分光器を取り付けると星像が 3 秒角なのに対し、スリット幅はおよそ 1.4 秒角となる。その分 1.6m の鏡でせっかく集めた光をロスしてしまうため効率が良くない。(→マッチングが悪い)

それによって 1 等星や木星など明るい天体をいれてもサチレーションを起こさず、カタログ作りを目的とした今回の観測では逆に好都合な面もあった。

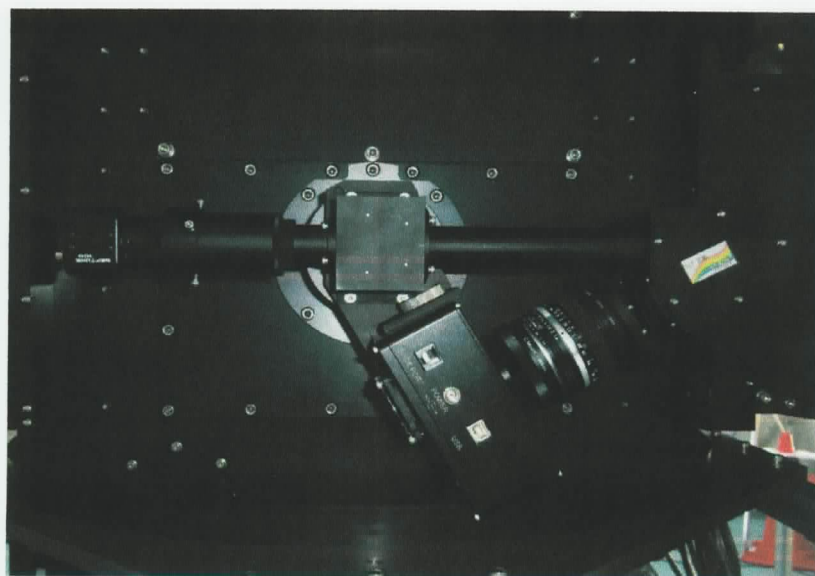


図 2.16 pirka 望遠鏡カセグレンインターフェースに取り付けた様子  
pirka 望遠鏡でも同様にアルミホイルを巻いて観測を行った。



## 2・4 実際の観測

### ・取得データ

#### フラットフィールドフレーム

CCD にはそのピクセルごとで感度にむらがある。このむらを補正するためにフラットフィールドフレームが必要となる。フラットフィールドフレームを取得するには望遠鏡に一樣光を入射し撮影する。Pirka 望遠鏡ではフラットパネルにランプをあて、反射させて一樣光を撮影する。



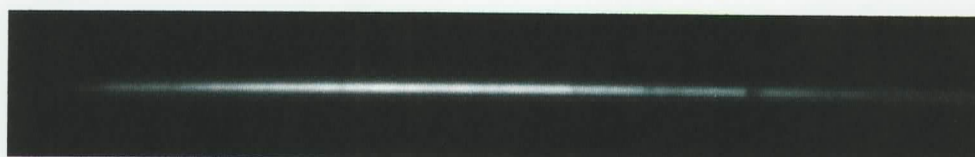
#### コンパリソソフレーム

既知の波長をもつ原子スペクトルランプの分光データ。今回はアルゴンランプとネオンランプを使用し、後で画像を合成して解析に使用した。光学系のゆがみにより輝線がななめになって出てきてしまう。下の画像は直交化処理をしたもの。



#### オブジェクトフレーム

##### 目的天体の分光データ



#### 分光標準星フレーム

スペクトルが既知であり、黒体放射と近似できる。CCD は波長によって感度に違いがあるため、その CCD の波長感度特性を求めるために使用する。今回分光標準星は iraf の

`usr/iraf/iraf/noao/lib/onedstds/spec16cal/`

に含まれている以下のリストから目的天体と近い分光標準星を選んだ。

|        |                     |
|--------|---------------------|
| HR718  | くじら座 $\xi$ 2        |
| HR1544 | オリオン座 $\pi$ 2       |
| HR3454 | うみへび座 $\eta$        |
| HR4468 | コップ座 $\theta$       |
| HR4963 | おとめ座 $\theta$       |
| HR7596 | わし座 58 番星           |
| HR7950 | みずがめ座 $\varepsilon$ |
| HR8634 | ペガサス座 $\zeta$       |
| HR9087 | うお座 29 番星           |

分光標準星は目標天体と高度、時刻、方角が同じであることが理想的である。しかし分光標準星の数は多くなく、同じ高度で撮ることは難しいためひとつの分光標準星を時間をおいて高度を変えて撮ったり、複数の分光標準星を高度ごとに撮っておく必要がある。

#### バイアスフレーム

CCD が画像を読みだす際にかかる電圧によるノイズ。露出時間 0 秒(本分光器の CCD の場合は 0.04 秒)で読みだす。



#### ダークフレーム

暗電流ノイズ。CCD の熱で電荷が溜まり暗電流が発生してしまう。CCD を冷却するのはこのダークノイズを減らすために行う。目標天体を撮ったときと同じ露出時間で CCD のシャッターを閉じた状態で撮る。CCDOPS では撮像するときにダークを同時に引いてしまうことができる。その際、カウント数が自動的に+100 されてしまうので、解析の際には-100 してあげる必要がある。また、ダークフレームとライトフレームを別々に取得した際、サチュレーションを起こしていたり、明るい天体を撮影すると天体の残像が残ってしまうことがある。残像部分のカウントを見てもみるとライトフレームの天体のスペクトル部分のカウントの 1% 未満であったので気にしなくてよい。



## スカイ

**pirka** 望遠鏡での観測では明るい天体の場合、積分時間は短くて済む。そうすると **sky** がうつらないので、天体をスリットからずらして位置合わせのために別にスカイをとっておく必要があった。スカイは雲に反射した市街光や地球大気から放射された夜光がうつる。市街光に含まれる蛍光灯(HgI)の  $5460.74\text{\AA}$  輝線を主に使って位置合わせを行う。





- ・観測手順  
観測前に…

- ①分光器自体のピントを合わせる

分光器に直接スペクトルランプを当てて輝線がはっきりとうつる位置にピントを合わせる。今回は $\infty$ ~5 寄りの位置でピントを合わせた。

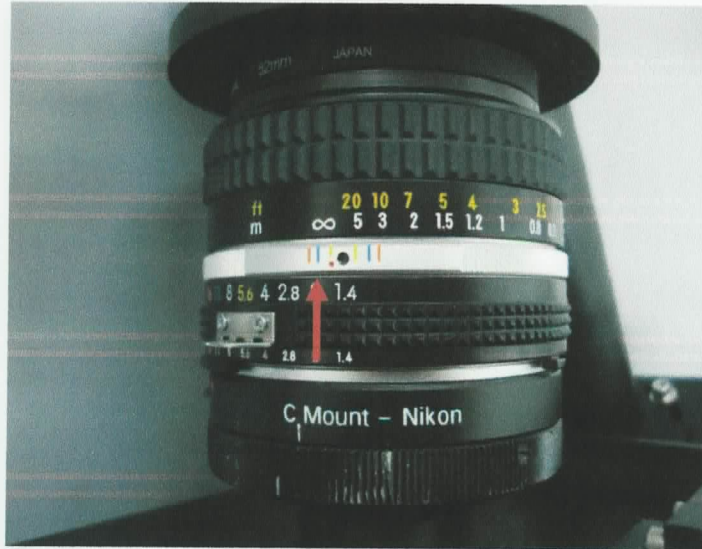


図 2.17 ピント調整

- ②スリットビューワーでスリットがはっきりと見えるように合わせる

望遠鏡に取り付けた後に、周囲が明るい状態でスリットビューワーを見てスリットがはっきりと映る位置に合わせる。そのままだと距離が足りなかったため watec 社の小型 CCD に付属している C マウントアダプター(×5)をつないで伸ばした。



図 2.18 C マウントアダプターを取り付けた様子

### ③望遠鏡のピントを合わせる

明るい天体を入れ、像が一番小さくなるようにピントを調節する。1.6m 望遠鏡では焦点制御の数値を変え、副鏡を移動させてピントを調整する。

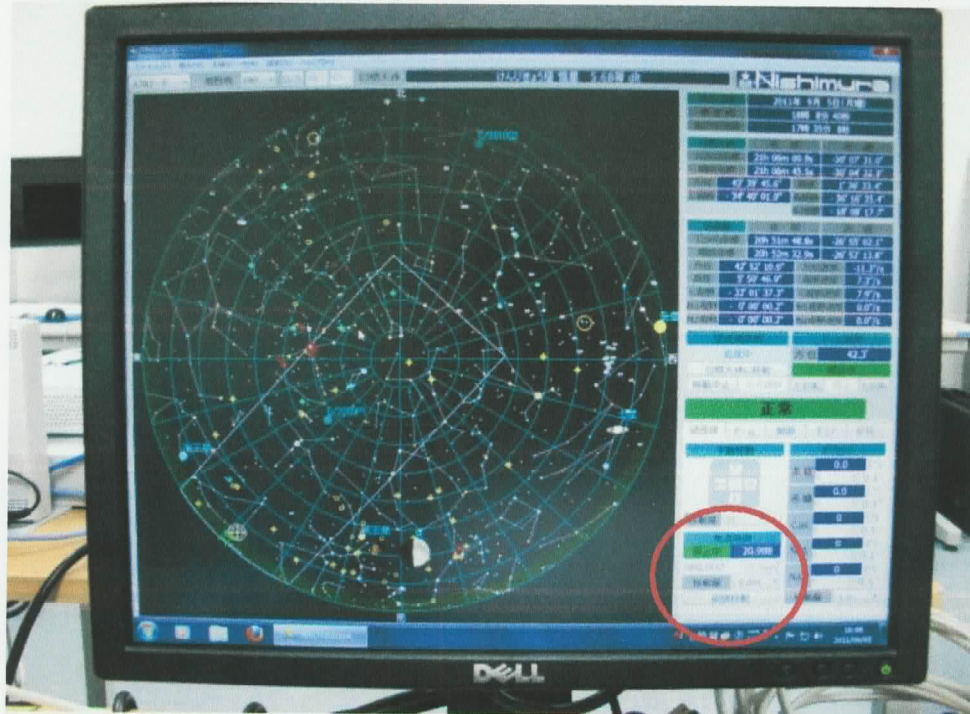


図 2.19

### ・ビニング調整

ビニングとはいくつかのピクセルを1ピクセルとして扱うことを言う。例えば2×2ビニングの場合は隣り合った4つのピクセルを1ピクセルとして画像を扱う。これにより画像のデータサイズは元の1/4になり、解像度も1/4に落ちる。解像度は落ちるが、処理速度も速くなるので3×3ビニングで撮影した。(1×1ビニングで撮影したデータもある)

ST-402ME の場合

1×1 (高解像度)・・・765×510 ピクセル(390,150 画素)

2×2(中解像度)・・・382×255 ピクセル(97,410 画素)

感度 4 倍 画素数 1/4

3×3 (低解像度)・・・255×170 ピクセル(43,350 画素)

感度 9 倍 画素数 1/9



#### 2・4・1 pirka 望遠鏡での観測

本学分光器を用いた分光観測は 8 月、9 月、11 月、12 月、1 月に pirka 望遠鏡の使用許可をもらい、行った。

##### ・ 8/23～25 の観測

3 日間とも曇り

分光器の取り付けと動作テストがメインだったが、24 日は雲の合間を狙って 1 等星を撮ることができた。

##### ・ 分光器取り付け作業

ケーブルを操作室まではわせる

線を固定

同軸ケーブルのはんだ付け

1.6m 望遠鏡に分光器を取り付けるにあたって、スリットビューワー用の CCD に取り付ける同軸ケーブルを床に這わせる作業とそのはんだ付け、リモコンや電源などの配線を望遠鏡に固定する作業を行った。これらの作業は望遠鏡を動かした際にひっかかったりすることを防ぐために行った。この時に分光器を pirka 望遠鏡に取り付けるためのアダプターを鉄工所でつくってもらった。

##### ・ 1 等星(vega,altair,dneb,cas $\alpha$ など)を分光

→分光標準星が撮れず、データとしては使えない



図 2.20 はんだ付けの様子とアダプター



・ 9/5~8

9/8 が晴れ、そのほかは曇りだった。分光器のずれとフラットのテストを行った。分光器のずれは解消されず、8 日に取得したデータはあまり精度のよいデータとはいえない。

→分光器のずれのテスト

そのままの状態フラットを撮る

タイラップで固定されている部分を外して撮る

CCD のねじを締めて撮る

分光器をはずし、直接白熱灯を当てて撮る

} フラットランプ・コンパ  
リソンランプ・白熱灯で  
それぞれ撮る

・ 11/28~12/4

フラットテスト

フラットパネルに pirka のフラットランプをあてて撮る

ドームの壁に pirka のフラットランプをあてて撮る

白熱灯を筒先から入れて撮る

} + 蛍光灯・Hg ラ  
ンプでもそれぞれ  
撮る

分光器自体をアルミホイルで巻き、外部からの光が入らないようにする  
(アルミホイル有りと無しでフラット+コンパリソンを撮り比較)

データ取得

恒星(各スペクトル型ごと&主系列星と巨星)

惑星

惑星状星雲

・ 12/12~18

1 週間曇りあるいは雪が続き、ちゃんと観測できたのは 18 日のみ。

・ 1/7・8

アンドロメダ銀河の撮像

2-4-2 50cm 望遠鏡での観測

12/19・20

19 日は曇りだったが、20 日は 22 時過ぎまで快晴となり観測ができた。

木星、ガリレオ衛星、M42(オリオン大星雲)など撮像

### 2-4-3 観測にあたって

#### ・ CCD のずれ

当初 CCD はねじ 1 本でとめられており、望遠鏡の角度や分光器の姿勢により CCD にかかる力が変わることによって画像にずれが生じてしまった。これを解決するために一度京都産業大学虹工房に送り返し、CCD を 2 本止めに改良し、動作テストを行って頂いた。その後本学でもテストを行ったが CCD 画像のずれは 1 ピクセル以内に収まった。

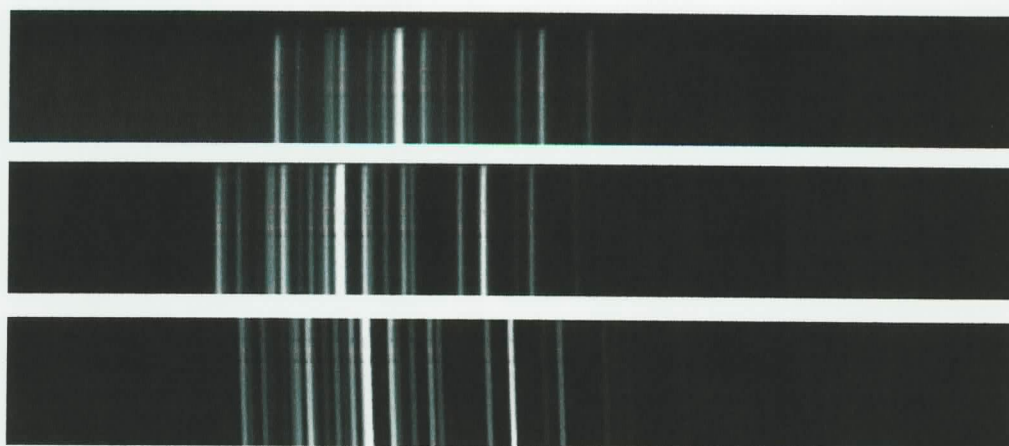
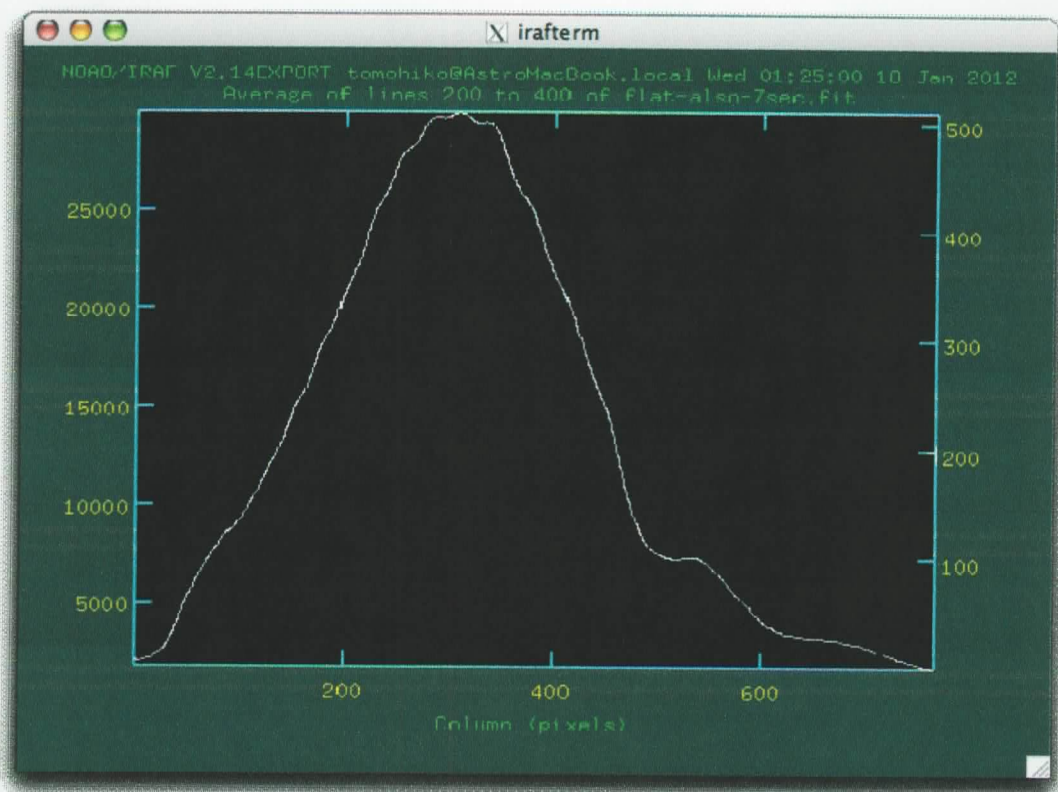


図 2.21 CCD 画像のずれ

#### ・ フラットフィールドフレームのむら

**pirka** 望遠鏡はフラットパネルにランプをあてフラットフィールドを撮る。  
**pirka** 望遠鏡に備え付けられているフラットランプを使用してフラットフィールドフレームを撮ると、一度暗くなってまた明るくなる部分ができる。初めはフラットパネルに問題があると思われたが、ドーム内の壁を撮っても同じようなむらができるのでフラットランプに問題があると推測した。分光観測において、このフラットを使って解析を進めていくと最終的に天体のスペクトルに変な盛り上がりができる。本来のスペクトルの強度からすると異常なことであるので、ピリカ望遠鏡のフラットランプを使わずに白熱灯をパネルにあてるようにしてフラットフィールドを撮ることとした。

【ピリカ望遠鏡のフラットランプ】



【白熱灯】



図 2.22 ピリカ望遠鏡のフラットランプによるフラットフィールドフレームと白熱灯によるフラットフィールドフレームの比較



・画像のずれ

ピリカ望遠鏡を使った観測では、本学分光器は大型望遠鏡に取り付けるようにつくられておらず、コンパリソンとフラットフィールドを撮る際には望遠鏡の向きを変えなければ撮ることができない。本来であれば目標天体を撮ったときと同じ姿勢のままコンパリソンとフラットフィールドを撮ることが好ましい。姿勢を変えてしまうことで、分光器にかかる力の変化により CCD にずれが生じてしまう。本来、大型望遠鏡に取り付ける分光器はボックス型になっており中にコンパリソンのランプが備え付けられている。その分重量が重くなるが、CCD のずれなど気にせずに観測することができる。本学分光器はそのようなつくりになっていないため解析の際にこのずれがどれくらいかを知るための手がかりとして、目標天体・分光標準星を撮ったときには一緒にスカイも撮ること、コンパリソン・フラットフィールドを撮る際には水銀ランプも撮ることとした。スカイは雲などに反射した市街光がうつり水銀の  $5460.74 \text{ \AA}$  と  $5769.59 \text{ \AA}$ 、 $5790.65 \text{ \AA}$  輝線などが出る。これらを利用して画像の位置合わせを行う。

取得データ

・主系列星

| スペクトル型 | 主系列星                      | 視等級  | 絶対等級  | 備考   | date  |
|--------|---------------------------|------|-------|------|-------|
| O 型    | Ori $\sigma$ (O9.5V)      | 3.77 | -3.96 |      | 12/4  |
| B 型    | Per $\beta$ (アルゴル B8V)    | 2.1v | -0.18 | 食変光星 | 11/28 |
|        | Per $\epsilon$ (B0.5V)    | 2.90 | -3.19 |      | 12/2  |
|        | Aur $\eta$ (B3V)          | 3.18 | -0.96 |      | 12/1  |
|        | Cmi $\beta$ (ゴメイサ B8Vvar) | 2.90 | -0.70 |      | 12/4  |
|        | Vir $\alpha$ (スピカ B1V)    | 1.0  | -3.55 |      | 12/18 |
| A 型    | Aur $\beta$ (メンカリナン A2V)  | 1.90 | -0.10 |      | 12/1  |
|        | Gem $\lambda$ (A3V)       | 3.58 | 1.27  |      | 12/1  |
|        | Urs $\beta$ (メラク A1V)     | 2.23 | 0.41  |      | 12/2  |
|        | Leo $\delta$ (A4V)        | 2.56 | 1.32  |      | 12/18 |
| F 型    | Peg $\iota$ (F5V)         | 3.77 | 3.42  |      | 12/2  |
|        | Gem $\rho$ (F0V)          | 4.16 | 2.82  |      | 12/1  |
|        | Ori $\pi$ 3 (タビト F5V)     | 3.19 | 3.67  |      | 12/2  |
| G 型    | Aur $\lambda$ (G0V)       | 4.69 | 4.18  |      | 12/1  |
|        | Cas $\eta$ (G0V)          | 3.46 | 4.59  |      | 12/4  |
| K 型    | Eri $\epsilon$ (K2V)      | 3.72 | 6.18  |      | 12/2  |
| M 型    |                           |      |       |      |       |

・巨星

| スペクトル型 | 巨星                                    | 視等級  | 絶対等級  | 備考 | date  |
|--------|---------------------------------------|------|-------|----|-------|
| O 型    | Ori $\zeta$ (アルニタク O9.7Ib)            | 1.74 | -5.25 |    | 12/2  |
|        | Per $\xi$ (O7.5Iab)                   | 3.98 | -4.70 |    | 12/2  |
|        | Ori $\lambda$ (メイサ A O8III)           | 3.39 | -4.16 |    | 12/2  |
|        | Ori $\delta$ (ミンタカ O9.5III)           | 2.25 | -4.99 |    | 12/2  |
| B 型    | Ori $\epsilon$ (アルニラム B0Ia)           | 1.69 | -6.38 |    | 12/1  |
|        | Per $\zeta$ (メンキブ B1Ib)               | 2.84 | -4.55 |    | 12/2  |
|        | Ori $\gamma$ (ベラトリックス B2III)          | 1.64 | -2.72 |    | 12/4  |
|        | Leo $\rho$ (B1Ib)                     | 3.84 | -7.38 |    | 12/18 |
| A 型    | Gem $\alpha$ (カストル A2V <sub>m</sub> ) | 1.6  | 0.59  |    | 12/2  |
|        | Gem $\theta$ (A3III)                  | 3.60 | -0.30 |    | 12/2  |
|        | Urs $\epsilon$ (アリオト A0p)             | 1.76 | -0.21 |    | 12/2  |

|     |                                              |       |       |             |       |
|-----|----------------------------------------------|-------|-------|-------------|-------|
|     | Can $\alpha$ (アクベンス A5m)                     | 4.26  | 0.63  |             | 12/4  |
|     | Mon $\varepsilon$ (A5IV)                     | 4.39  | 1.41  |             | 12/4  |
|     | Leo $\eta$ (A0Ib)                            | 3.48  | -5.60 |             | 12/18 |
| F 型 | Per $\alpha$ (F5Ib)                          | 1.8   | -4.50 |             | 12/2  |
|     | Cmi $\alpha$ (プロキオン F5IV-V)                  | 0.4   | 2.65  |             | 12/4  |
|     | Gem $\delta$ (F0IV)                          | 3.50  | 2.22  |             | 12/2  |
| G 型 | Cam $\beta$ (G0Ib)                           | 4.03  | -3.40 |             | 12/1  |
|     | Leo $\varepsilon$ (ラス・エラセド・アウス<br>トラリス G0II) | 2.97  | -1.46 |             | 12/18 |
|     | Boo $\eta$ (G0IV)                            | 2.68  | 2.41  |             | 12/18 |
| K 型 | Leo $\gamma$ (アルギエバ K0III)                   | 2.01  | -0.92 |             | 12/1  |
|     | Gem $\beta$ (ポルックス K0III)                    | 1.1   | 1.09  |             | 12/1  |
|     | Boo $\alpha$ (アークトゥルス K1.5III)               | -0.05 | -0.31 |             | 12/18 |
|     | Tau $\alpha$ (アルデバラン K5III)                  | 0.85  | -0.65 |             | 11/28 |
|     | Ari $\alpha$ (ハマル K2III)                     | 2.2   | 0.48  |             | 11/28 |
| M 型 | And $\beta$ (メラク M0IIIvar)                   | 2.1   | -1.86 |             | 12/4  |
|     | Per $\rho$ (M3III)                           | 3.32  | -1.67 |             | 12/2  |
|     | Peg $\beta$ (シェアト M2II-III)                  | 2.3v  | -1.49 | 不規則変光<br>星  | 12/2  |
|     | Ori $\alpha$ (ベテルギウス M2Ib)                   | 0.4v  | -5.14 | 半規則型変<br>光星 | 12/4  |
|     | Gem $\mu$ (M3IIIvar)                         | 2.87  | -1.39 |             | 12/4  |
|     | Boo34(M3III)                                 | 4.80  | -2.38 |             | 12/18 |
| C 型 | Ori BL(C5II)                                 | 6.30  | -1.70 | 炭素星         | 12/2  |



| 天体 | 天体名      | 観測日       | 観測望遠鏡 | 備考               |
|----|----------|-----------|-------|------------------|
| 惑星 | 水星       | 12/18     | 1.6m  | 高度 10° 以下、薄明中に取得 |
|    | 金星       | 12/20     | 50cm  | 高度 30° 以下で取得     |
|    | 火星       | 12/1,18   | 1.6m  |                  |
|    | 木星       | 12/4,20   | 50cm  | ガリレオ衛星のデータも取得    |
|    | 土星       | 12/1,2,18 | 1.6m  | 土星の環のデータも取得      |
|    | 天王星      | 12/2      | 1.6m  |                  |
| 星雲 | エスキモー星雲  | 12/2      | 1.6m  |                  |
|    | 木星状星雲    | 12/2      | 1.6m  |                  |
|    | キャッツアイ星雲 | 12/2      | 1.6m  |                  |
|    | オリオン大星雲  | 12/20     | 50cm  |                  |
| 銀河 | アンドロメダ銀河 | 1/8       | 1.6m  |                  |

※取得したデータのうち、解析不可能だったものも含む。

### 3. 解析

#### 3-1 解析方法

今回は IRAF を用いて分光データの解析を行った。

IRAF とは Image Reduction and Analysis Facility の略であり、アメリカ国立光学天文台によって作成されたソフトウェアである。天文データの解析を目的とする。Unix 系の OS で使用することができる。Cgwin をインストールすることで Windows 上でも利用することができる。

美星天文台の川端氏が開発された BeSpec も簡易ではあるものの解析に使うことができるので、IRAF を用いる前にまずはこちらで解析を行ってみてもよいと思う。

IRAF : <http://iraf.nao.ac.jp/iraf/web/>

BeSpec : <http://www.town.bisei.okayama.jp/bao/soft/bespec/>

#### 3-2 解析手順

取得したオブジェクトフレームには天体からの光だけでなく、さまざまな光やノイズも乗っている。

オブジェクトフレーム

```
<obj>*<air>*<telescope>*<instr>*<ccd>
```

air…大気透過率 telescope…反射 instr…回折効率 ccd…感度

フラットフレーム

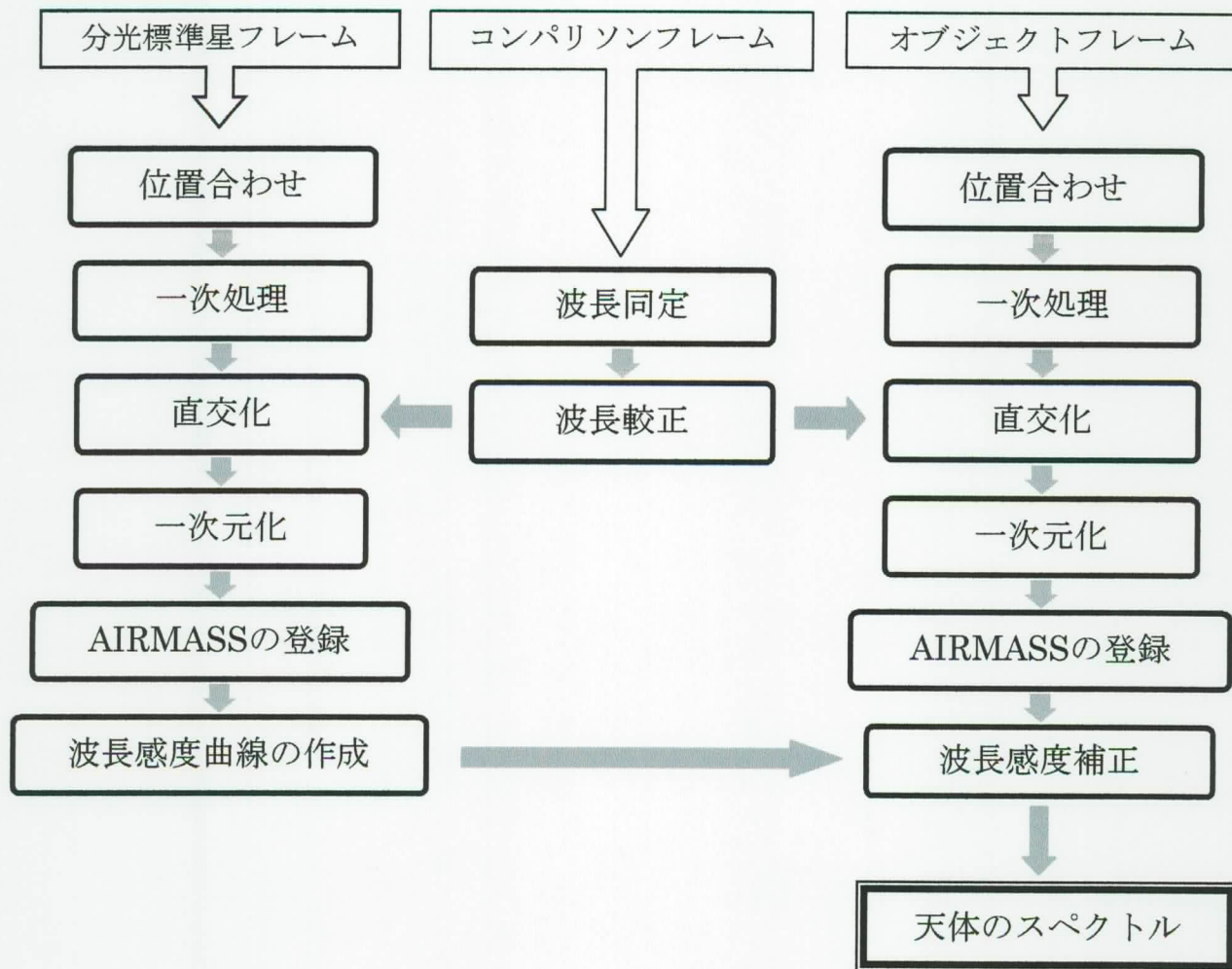
```
<lamp>*<telescope>*<instr>*<ccd>
```

フラットフレームで割ってあげると…

```
<obj>*<air>/<lamp>
```

このようにオブジェクトフレームから不必要な情報を除いていくことで本来のオブジェクトの情報だけを得る。

・解析の流れ





解析前に…

- observatory の設定

データを処理する前に観測地の設定を行っておく。観測地はなよろ天文台のパラメーターで設定した。

➤ epar observatory

```

                                IRAF
                                Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = noao
TASK = observatory

command = █          set Command (setlistimages)
obsid =             Nayoro Observatory to set, list, or image default
images =             List of images
(verbose=           no) Verbose output?

(observa=           obspars) Observatory identification
(name = Nayoro Astoronomical Observatory) Observatory name
(longitu=           44.22) Observatory longitude (degrees)
(latitud=           142.28) Observatory latitude (degrees)
(altitud=           151.) Observatory altitude (meters)
(timezon=           -9.) Observatory time zone
override=           obspara Observatory identification
(mode =             ql)
```

- xgterm の起動 : xgterm

xterm で起動させる

- IRAF の起動 : cl

xgterm 上で起動させる

```

NOAO/IRAFNET PC-IRAF Revision 2.14 Fri Nov 30 15:27:05 MST 2007
This is the RELEASED version of IRAF V2.14 supporting PC systems.

Welcome to IRAF. To list the available commands, type ? or ??. To get
detailed information about a command, type 'help <command>'. To run a
command or load a package, type its name. Type 'bye' to exit a
package, or 'logout' to get out of the CL. Type 'news' to find out
what is new in the version of the system you are using.

Visit http://iraf.net if you have questions or to report problems.

The following commands or packages are currently defined:

      IIIII  RRRR   AAA   FFFFF
      I      R  R   A  A   F
      I      RRRR  AAAAA  FFF
      I      R  R   A  A   F
      IIIII  R  R   A  A   F

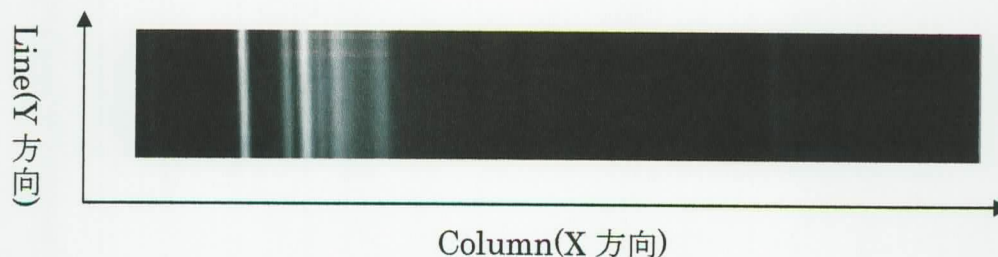
apropos  fitsutil.  lists.   plot.     stsdas.
color.   gemini.   mscred.  proto.   system.
ctio.    gmisc.    nmisc.   salt.    tables.
dataio.  images.   noao.    softools. utilities.
dbms.    language. obsolete. stlocal. xdimsum.

ec1> █
```

# ①位置合わせ

## ・ ずれの確認(implot)

➤ implot obj\_sky



l ...line 表示  
 c ...column 表示  
 : x a b ...x 軸の a~b の範囲を表示  
 : y a b ...y 軸の a~b の範囲を表示  
 : c a b ...column の a~b の範囲を足し合わせて表示  
 : l a b ...line の a~b の範囲を足し合わせて表示  
 スペース ...座標値表示  
 q ...戻る

## ・ 位置合わせ(imshift)

sky にうつる水銀の 5460.74Å輝線を主に使い波長方向を合わせ、CCD の画像の打ち止め(?)の線を利用して空間方向の位置合わせを行う。implot でピクセル値を確認してずれがあるようなら imshift で x 方向と y 方向への移動数を決めて動かす。これはコンパソフレームでも同じように行う。

➤ imshift object

```

                                I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = immatch
TASK = imshift

input  =      hr9087.fit  Input images to be fit
output =      hr9087s    Output images
xshift =      1.         Fractional pixel shift in x
yshift =      0.         Fractional pixel shift in y
(shifts_ =    )          Text file containing shifts for each image
(interp_ =    linear)    Interpolant (nearest,linear,poly3,poly5,spline3,sin
(boundar_ =    nearest)  Boundary (constant,nearest,reflect,wrap)
(constan_ =    0.)       Constant for boundary extension
(mode   =      ql)

```

## ②一次処理

- ・フラットフレームの合成(imcombine)

取得したフラットフレーム(10 枚ほど)を 1 枚の画像に合成する。

まずはリストをつくる

terminal で

- `ls > flat.list`
- `emacs flat.list`
  - `control+k` : リストからファイルを消す
  - `control+x+s` : 保存
  - `control+x+c` : 消去/戻る

xgterm で

`images>immatch>imcombine`

- `imcombine @リスト名`  
10 枚を平均化して 1 枚の画像を作成した。

```
immatch> imcomb @1204flat.list
List of output images (1204flat):

Jan 12 20:57: IMCOMBINE
  combine = average, scale = none, zero = none, weight = none
  reject = sigclip, mclip = yes, nkeep = 1
  lsigma = 1., hsigma = 1.
  blank = 0.
      Images
1202flat_part5_001.fit
1202flat_part5_002.fit
1202flat_part5_003.fit
1202flat_part5_004.fit
1202flat_part5_005.fit
1202flat_part5_006.fit
1202flat_part5_007.fit
1202flat_part5_008.fit
1202flat_part5_009.fit
1202flat_part5_010.fit

Output image = 1204flat, ncombine = 10
```

- ・フラットフレームの規格化(imarith)

フラットフレームの画像のカウント数の平均値で割り、平均値を 1 とする。

- `imstat` ファイル名

ファイルの統計データを見ることができる。

```
ecl> imstat 1202flat.fit
#      IMAGE      NPIX      MEAN      STDDEV      MIN      MAX
      1202flat.fit    390150    7521.    5924.    382.5    26065.
```

MEAN=平均値, STDDEV=標準偏差, MIN=最小値, MAX=最大値



➤ imarith フラットファイル / 平均値

```
ecl> imarith 1202flat.fit / 7521 1202flat_n
```

・一次処理(imarith)

オブジェクトフレームを規格化したフラットフレームで割る。CCD の感度むらを補正する。

➤ imarith オブジェクト / フラット 新しいファイル名

・画像の直交化(identify)

光学系による画像のゆがみをなおす。まずはコンパリソフレームを直交化し、その fitcoord ファイルをそのままオブジェクトにもつかって transform すると、オブジェクトも直交化することができる。下の図は imarith で Ar と Ne を合成したもの。

```
twodspec>longslit>identify
```

・波長同定

Ne と Ar の既知の波長を同定してあげることで横軸を波長(Å)に変換できる

➤ identify コンパリソファイル

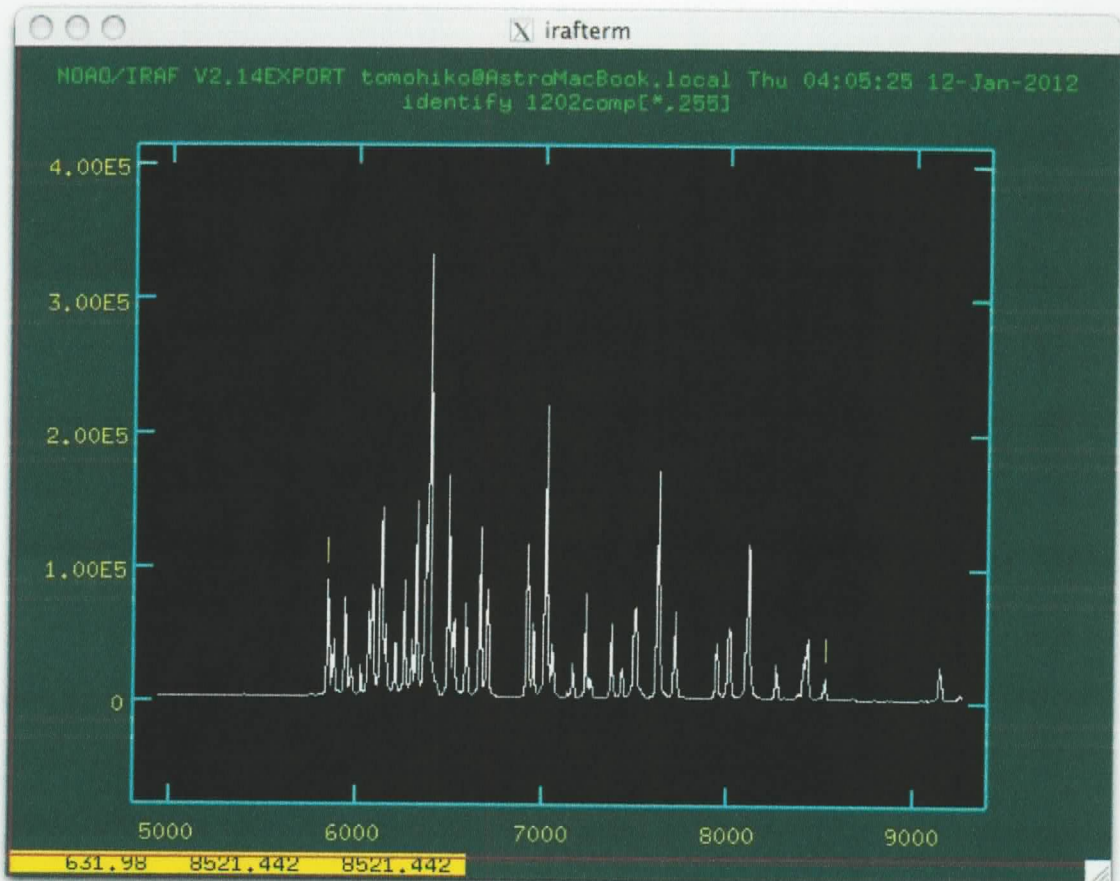


図 3.1 identify : 波長同定の様子

m : 波長入力  
 d : 消去  
 f : 残差表示  
 j : ひとつ戻る  
 h :  
 k :  
 l : 自動同定  
 i : 初期化  
 shift+x : 横に拡大  
 w→t : 上側ズーム  
 w→b : 下側ズーム  
 w→a : 戻る  
 波長同定した部分で z : ズーム  
       →p : ズーム解除  
 q : iraf に戻る

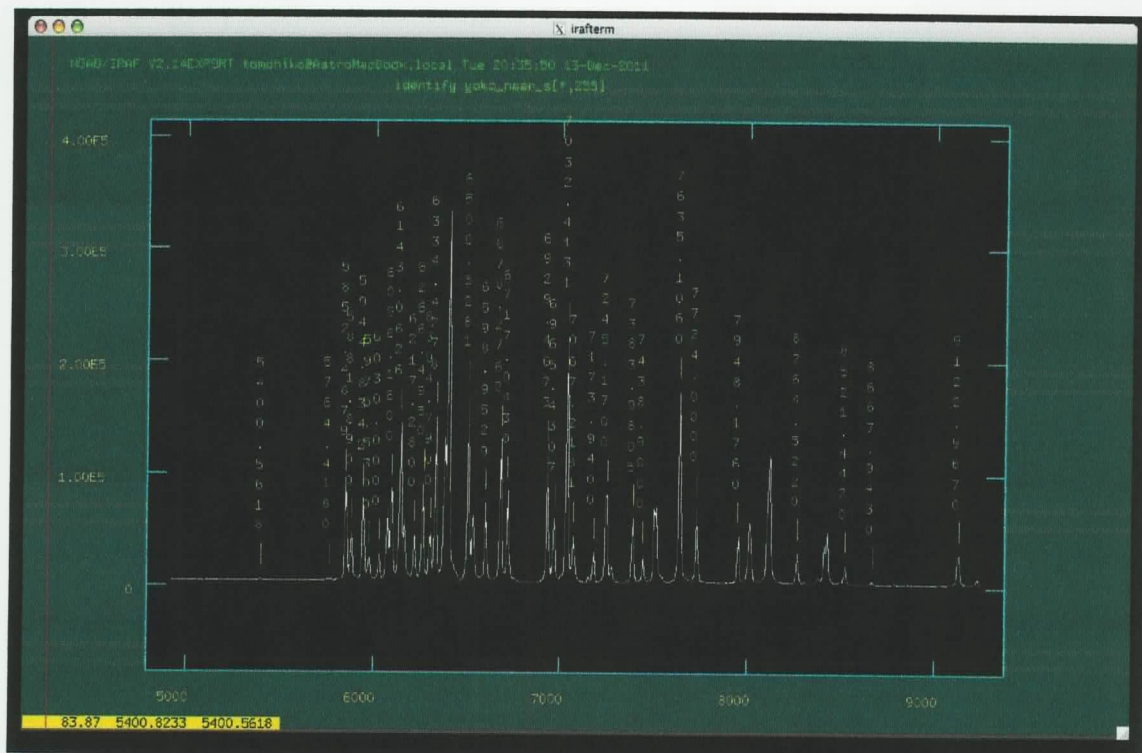


図 3.2 identify : 波長入力の結果

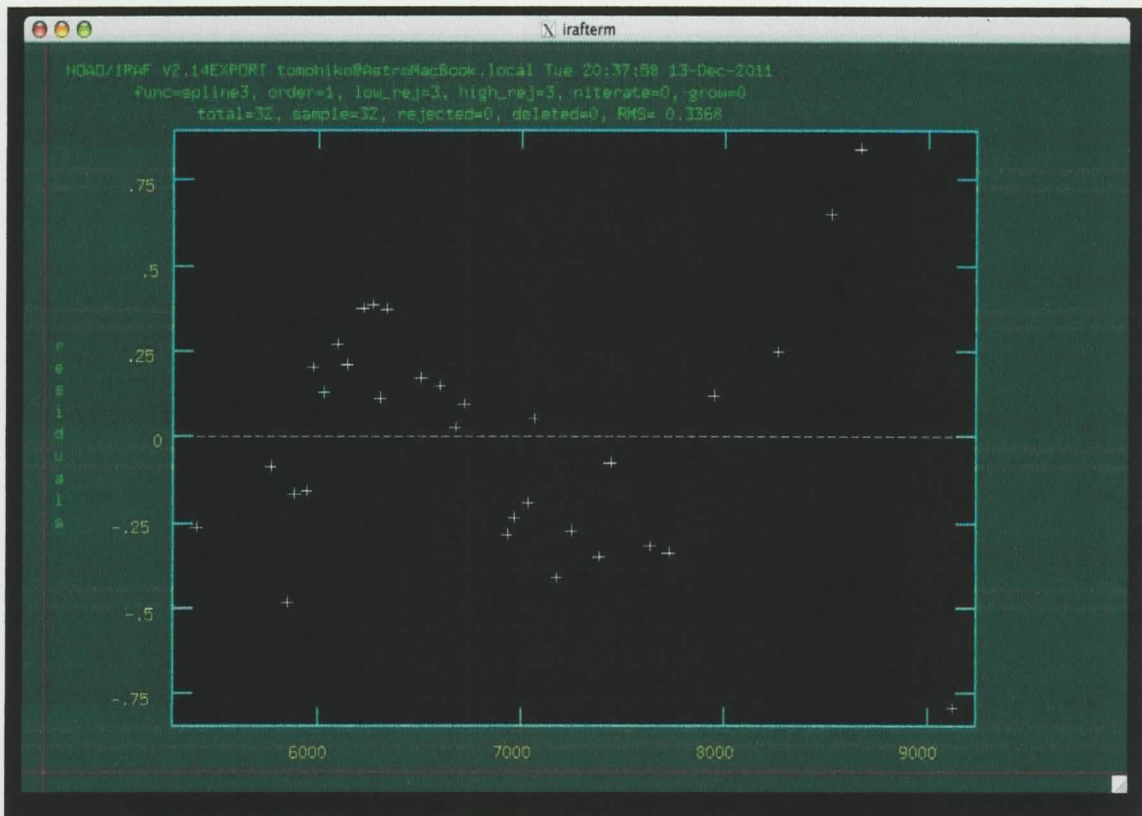


図 3.3 identify : 残差表示

低分散なので強度の小さい輝線は隣の強度の大きい輝線とひとつに見えてしまう場合がある。2つの輝線が重なっているものを同定してしまうと残差が大きくなってしまうので使わない方がよい。

- reidentify ファイル名 ファイル名 verbose+
- fitcoord ファイル名 2 (.fits を消す)

```
longslit> fitcoord 1202comp
Fit 1202comp interactively (yes):

NOAO/IRAF V2.14EXPORT tomohiko@AstroMacBook.local Thu 04:20:43 12-Jan-2012
Longslit coordinate fit name is 1202comp.
Longslit database is database.
Features from images:
  1202comp
Map User coordinates for axis 1 using image features:
Number of feature coordinates = 1475
Mapping function = chebyshev
  X order = 6
  Y order = 6
Fitted coordinates at the corners of the images:
  (1, 1) = 4941.616 (765, 1) = 9282.742
  (1, 510) = 4880.501 (765, 510) = 9244.231
Write coordinate map to the database (yes)?
```

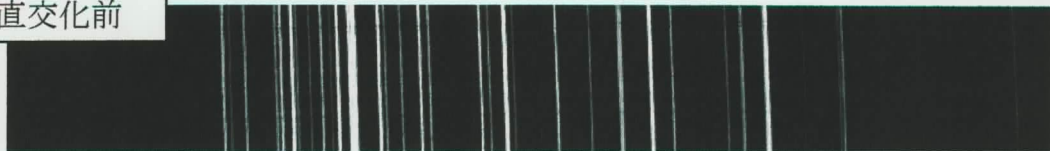


➤ transform ファイル名 新しいファイル名 ファイル名 2

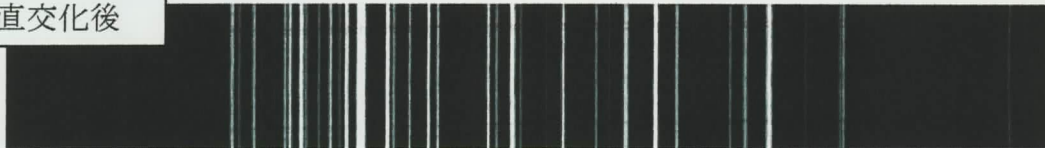
```
longslit> transform 1202comp.fits 1202comp_t 1202comp

NOAO/IRAF V2.14EXPORT tomohiko@AstroMacBook.local Thu 04:23:32 12-Jan-2012
Transform 1202comp.fits to 1202comp_t.
Conserve flux per pixel.
User coordinate transformations:
  1202comp
Interpolation is spline3.
Using edge extension for out of bounds pixel values.
Output coordinate parameters are:
  x1 = 4881., x2 = 9283., dx = 5.762, nx = 765, xlog = no
  y1 = 1., y2 = 510., dy = 1., ny = 510, ylog = no
Dispersion axis (1=along lines, 2=along columns, 3=along z) (1:3) (1):
```

直交化前



直交化後



コンパリソフレームの画像を直交化できたら、オブジェクトフレームも transform の fitcoord ファイルを comp のままで同じように変換する。

➤ transform オブジェクトファイル名 新しいファイル名 ファイル名 2

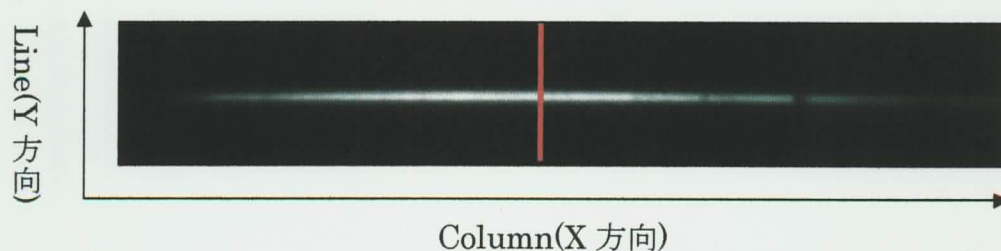
### ③一次元化

- ・半値幅の測定(implot)

天体のスペクトルの幅がどれくらいか調べる。半値幅、つまりシーイングサイズを測る。これにより望遠鏡に対する分光器のマッチングやその日の空の良し悪しを測ることができる。

➤ implot ファイル名

column 方向に表示し、天体の半値幅を測る。



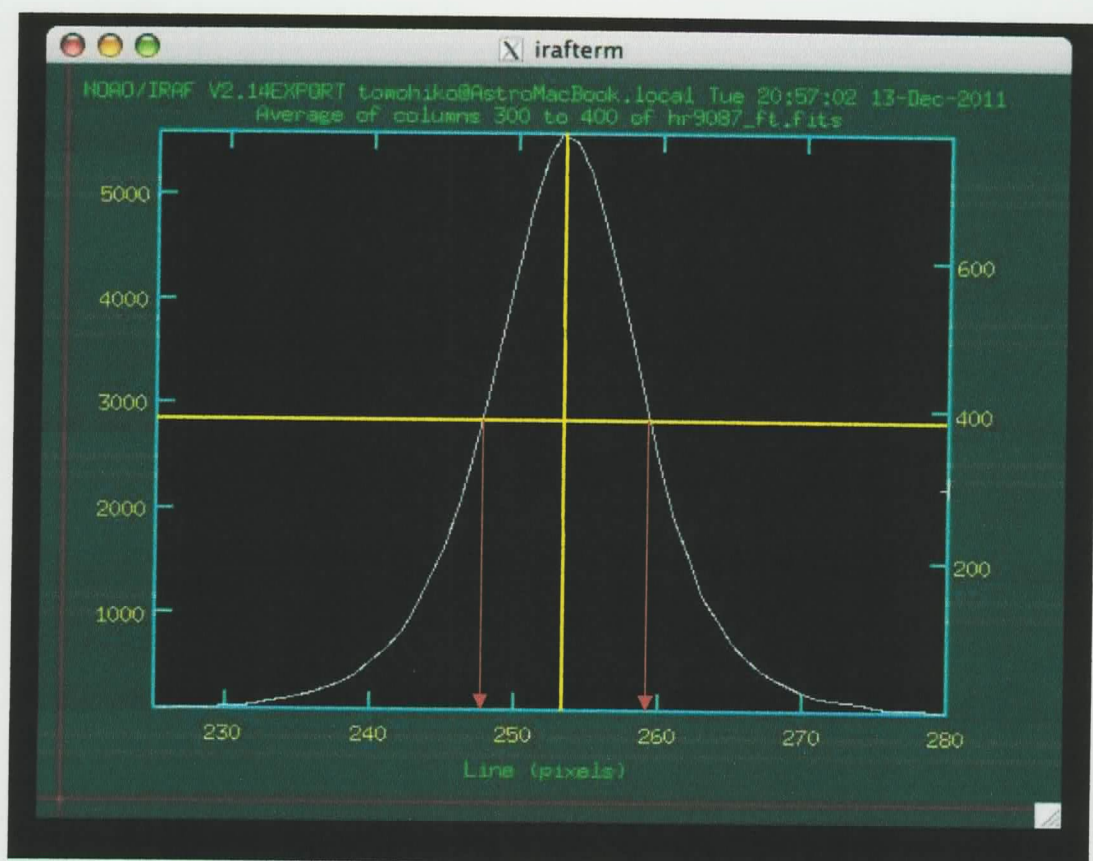


図 3.4 implot : 半値幅の測定

・一次元化(apall)

twodspec>apextract>apall

アパーチャーを決めてあげることで二次元の画像を一次元化する。この時、縦軸はカウント値、横軸は波長(pixel)である。この段階で一緒に background の範囲も決めてあげることで同時に引くことができる。先ほど調べた半値幅を入れ、空間方向に対する星像の大きさを決める。

➤ epar apall

```

                                I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = apextract
TASK = apall

input = ■      hr9087_f.fits List of input images
(output =      hr9087_ft) List of output spectra
(apertur=      1) Apertures
(format =      multispec) Extracted spectra format
(referen=      ) List of aperture reference images
(profile=      ) List of aperture profile images

(interac=      yes) Run task interactively?
(find =        yes) Find apertures?
(recente=      yes) Recenter apertures?
(resize =      no) Resize apertures?
(edit =        yes) Edit apertures?
(trace =       yes) Trace apertures?
(fittrac=      yes) Fit the traced points interactively?
(extract=      yes) Extract spectra?
(extras =      yes) Extract sky, sigma, etc.?
(review =      yes) Review extractions?

(line =        INDEF) Dispersion line
(nsum =        50) Number of dispersion lines to sum or median

                                # DEFAULT APERTURE PARAMETERS

(lower =       -5.) Lower aperture limit relative to center
(upper =       5.) Upper aperture limit relative to center
(apidtab=      ) Aperture ID table (optional)

                                # DEFAULT BACKGROUND PARAMETERS

(b_func=       chebyshev) Background function
(b_order=      2) Background function order
(b_sampl=      -30:-10,10:30) Background sample regions
(b_naver=      -100) Background average or median
(b_niter=      0) Background rejection iterations
(b_low_r=      3.) Background lower rejection sigma
(b_high_=      3.) Background upper rejection sigma
(b_grow =      0.) Background rejection growing radius

                                # APERTURE CENTERING PARAMETERS

(width =       5.) Profile centering width
(radius =      10.) Profile centering radius
(thresho=      0.) Detection threshold for profile centering

```



```

# AUTOMATIC FINDING AND ORDERING PARAMETERS

nfind = 1 Number of apertures to be found automatically
(minsep = 5.) Minimum separation between spectra
(maxsep = 1000.) Maximum separation between spectra
(order = increasing) Order of apertures

# RECENTERING PARAMETERS

(aprecen= ) Apertures for recentering calculation
(npeaks = INDEF) Select brightest peaks
(shift = yes) Use average shift instead of recentering?

# RESIZING PARAMETERS

(llimit = INDEF) Lower aperture limit relative to center
(ulimit = INDEF) Upper aperture limit relative to center
(ylevel = 0.1) Fraction of peak or intensity for automatic width
(peak = yes) Is ylevel a fraction of the peak?
(bkg = yes) Subtract background in automatic width?
(r_grow = 0.) Grow limits by this factor
(avglimi= no) Average limits over all apertures?

# TRACING PARAMETERS

(t_nsum = 10) Number of dispersion lines to sum
(t_step = 10) Tracing step
(t_nlost= 3) Number of consecutive times profile is lost before
legendre) Trace fitting function
(t_funct= 10) Trace fitting function order
(t_order= *) Trace sample regions
(t_sampl= 1) Trace average or median
(t_naver= 0) Trace rejection iterations
(t_niter= 3.) Trace lower rejection sigma
(t_low_r= 3.) Trace upper rejection sigma
(t_high_= 0.) Trace rejection growing radius
(t_grow =

# EXTRACTION PARAMETERS

(backgro= fit) Background to subtract
(skybox = 1) Box car smoothing length for sky
(weights= none) Extraction weights (none|variance)
(pfit = fit1d) Profile fitting type (fit1d|fit2d)
(clean = no) Detect and replace bad pixels?
(saturat= INDEF) Saturation level
(readnoi= 0.) Read out noise sigma (photons)
(gain = 1.) Photon gain (photons/data number)
(lsigma = 4.) Lower rejection threshold
(usigma = 4.) Upper rejection threshold
(nsubaps= 1) Number of subapertures per aperture
(mode = ql)

```

## ⑤AIRMASS の登録

- ・ AIRMASS を登録する

➤ hedit ファイル名 AIRMASS エアマス の値 add+ update+

```
longslit> hedit hr9087_fta.fits AIRMASS 1.51 add+ update+
hr9087_fta.fits,AIRMASS ( -> 1.51):
hr9087_fta.fits,AIRMASS: -> 1.51
update hr9087_fta.fits ? (yes):
hr9087_fta.fits updated
```

分光標準星とオブジェクトにも 1 次元化が終わったら AIRMASS を登録する

- ・ ファイルの情報を見る

➤ imhead ファイル名 long+

## ⑥波長感度補正

CCD ごとの波長に対する感度特性を求め、補正を加える。

- ・ スペクトルの対応データ作成(standard)

一次元化し、エアマスを登録した分光標準星を standard で全部 1 つのファイルに登録する

➤ stand ファイル名

```
longslit> stand hr9087_fta.fits
Output flux file (used by SENSFUNC) (1202std):
No extinction correction applied
hr9087_fta.fits(1):
Star name in calibration list (hr9087):
hr9087_fta.fits[1]: Edit bandpasses? (no=yes|NO|YES|NO!!YES!) (no):
```

- ・ 感度曲線の作成(sensfunc)

stand で登録したファイルから感度曲線を作成する。

➤ sensfunc ファイル名

```
Input standard star data file (from STANDARD) (1202std):
Output root sensitivity function imagename (1202sens):
No extinction correction applied
Fit aperture 1 interactively? (no=yes|NO|YES) (no=yes|NO|YES) (yes):
```

その CCD の波長感度曲線を求める。extinction file をここで作成することでエアマスの違いを補正することができる。

撮った標準星のエアマスがあまり変わらないと extinction file が作成できない場合がある。

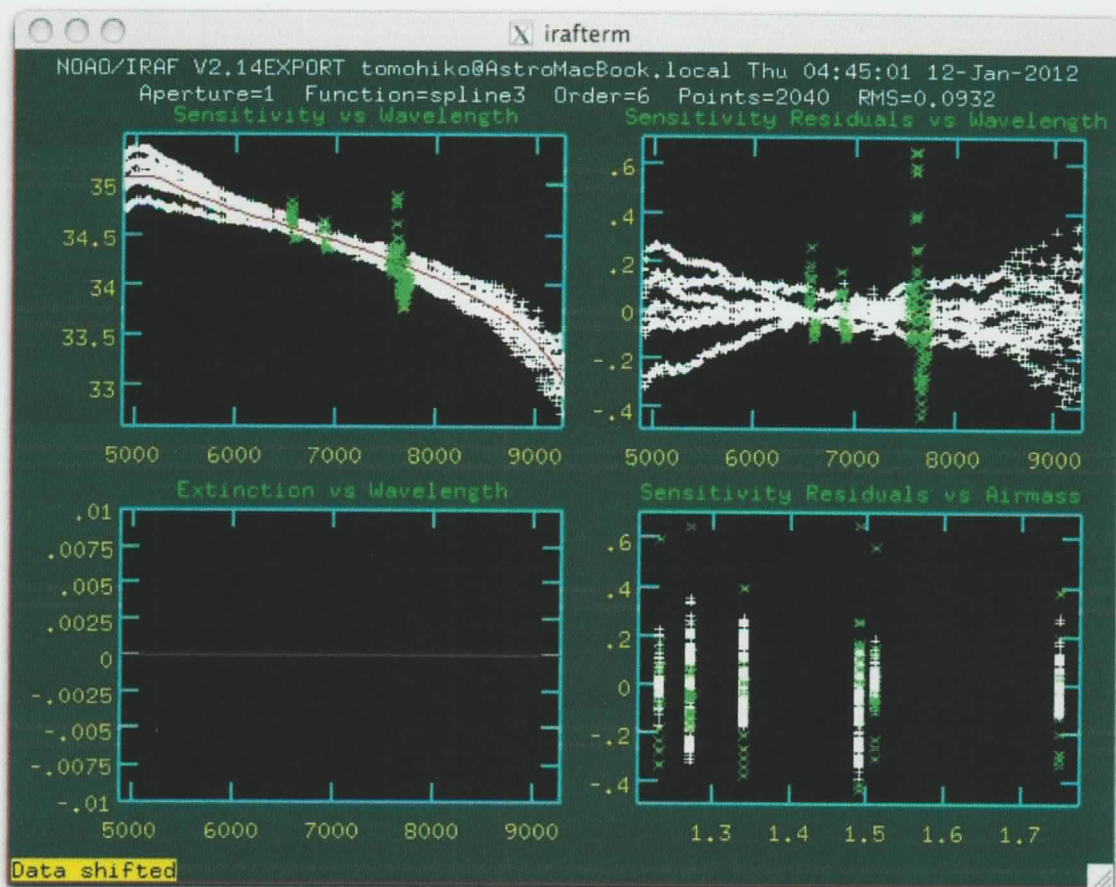


図 3.5 sensfunc

吸収線や S/N 比の悪い部分は消す

d+p : point …その点だけを消す  
 w : wavelength …その波長部分だけ消す  
 s : star …その点が属する恒星のデータごと消す  
 f : フィッティング  
 r : 再表示  
 s : 平均感度が同じになるようにシフト  
 e : extinction file 作成へ  
 : order a : 次数を a に変える  
 q : 終了



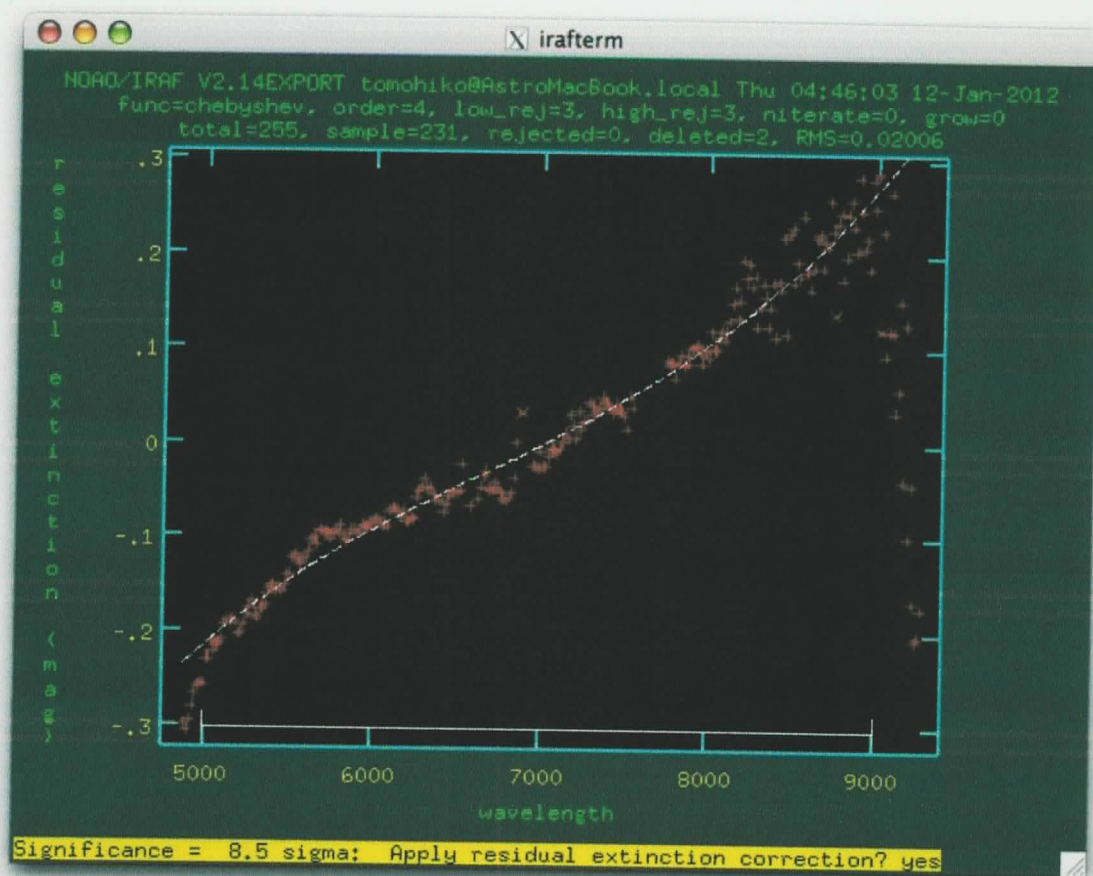


図 3.6 sensfunc

5000 以下と 9000 以上は CCD カメラの感度が悪いので使わない方がよい。フィッティングの悪い部分も消す

d : 消去

s → s : 範囲選択

f : フィッティング

q : 終了(yes としっかり打たないとファイルとして保存されない)

・波長感度補正(calibrate)

```

                                I R A F
                        Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = longslit
  TASK = calibrate

input  =      saturn_fta.fits  Input spectra to calibrate
output =      saturn_spe      Output calibrated spectra
(extinct=      yes) Apply extinction correction?
(flux  =      yes) Apply flux calibration?
(extinct=      1202extinct.dat) Extinction file
(observa=      )_.observatory) Observatory of observation
(ignorea=      yes) Ignore aperture numbers in flux calibration?
(sensiti=      1202sens) Image root name for sensitivity spectra
(fnu   =      no) Create spectra having units of FNU?
(mode  =      ql)

```

・スペクトルの確認(splot)

➤ splot obj\_spe

・テキストファイル

➤ wspecc obj\_spe

実行されない場合はファイル名[\* ,1]で1次元として扱うとできる  
知っていると便利なコマンド

・スクロールバー : sb

xgtem を開く際に、xterm で

➤ xgterm -sb &

と打つと、xgterm にスクロールバーをつけることができる

・居場所の確認 : pwd

自分が今このディレクトリにいるか確認できる

・ヘルプ : help

ヘルプを参照できる

・コマンドの短縮

コマンドを入力する際、コマンドが判別できる最低限の文字数で有効になる

ex)) display ⇒ disp

imarith ⇒ imar

・パラメーターの編集 : eparam

・ファイル名.fit\*の " \*" を消す

ターミナルで

➤ chmod 644 \*.fit

と打つと、そのディレクトリにあるデータのファイル名から \* を消すこ

とができる。

\* がついていてもデータとしてなにも問題はないが、リストを作成する際にファイル名の一部として認識され、できない場合があるのでそういった場合には消した方がよい。



#### 4 結果・考察

##### ・主な太陽吸収線(500nm~)

| 記号             | 波長(nm)  | 元素  | 強度   |
|----------------|---------|-----|------|
|                | 516.733 | Mg  | 935  |
|                | 517.270 | Mg  | 1259 |
|                | 518.362 | Mg  | 1584 |
|                | 525.022 | Fe  | 62   |
| E              | 526.955 | Fe  | 478  |
|                | 532.805 | Fe  | 375  |
|                | 552.842 | Mg  | 293  |
| D <sub>2</sub> | 588.997 | Na  | 752  |
| D <sub>1</sub> | 589.594 | Na  | 564  |
|                | 610.273 | Ca  | 135  |
|                | 612.223 | Ca  | 222  |
|                | 616.218 | Ca  | 222  |
|                | 630.250 | Fe  | 83   |
| H $\alpha$     | 656.281 | H   | 4020 |
|                | 849.806 | Ca+ | 1470 |
|                | 854.214 | Ca+ | 3670 |
|                | 866.217 | Ca+ | 2600 |

※H24 理科年表 国立天文台編

##### ・水素輝線

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$\lambda$  : 波長  $R$  : リュードベリ定数( $R=1.0974 \times 10^7$ )  $n, m$  : 自然数( $m > n$ )  
 本学分光器の観測波長域はおよそ 5000~9000Åであり、その間に見える水素輝線は

バルマー系列… $n=2$

$$m=3, 4, 5 \dots$$

波長の長い方から、H $\alpha$  (6562.81Å), H $\beta$  (4861.34Å), H $\gamma$  (4340.48Å) …と呼ばれ、波長が短くなるにつれて隣り合うスペクトル線が接近していく。H $\alpha$ 線はA型のスペクトルで最も強く現れる。

パッシェン系列… $n=3$

$$m=4, 5, 6 \dots$$

本学分光器ではパッシェン系列のスペクトルのつまるどころ(パッシェン限界)が吸収線として現れる。

・ 大気吸収

地上観測では大気による天体からの光の吸収の影響は避けられない。大気を構成する気体分子によってある特定の波長の光が吸収線として出てしまう。

主に強度の強いものは

6869.95 Å O<sub>2</sub>

7593.70 Å O<sub>2</sub>

8226.96 Å O<sub>2</sub>

8987.65 Å O<sub>2</sub>

7186 Å H<sub>2</sub>O

・ バックグラウンド

バックグラウンド(背景光)とは雲によって反射した市街光や大気の発光などの天体以外から望遠鏡にはいつてしまう光のことである。分光スペクトルの雑音源となって検出能力を低下させる。

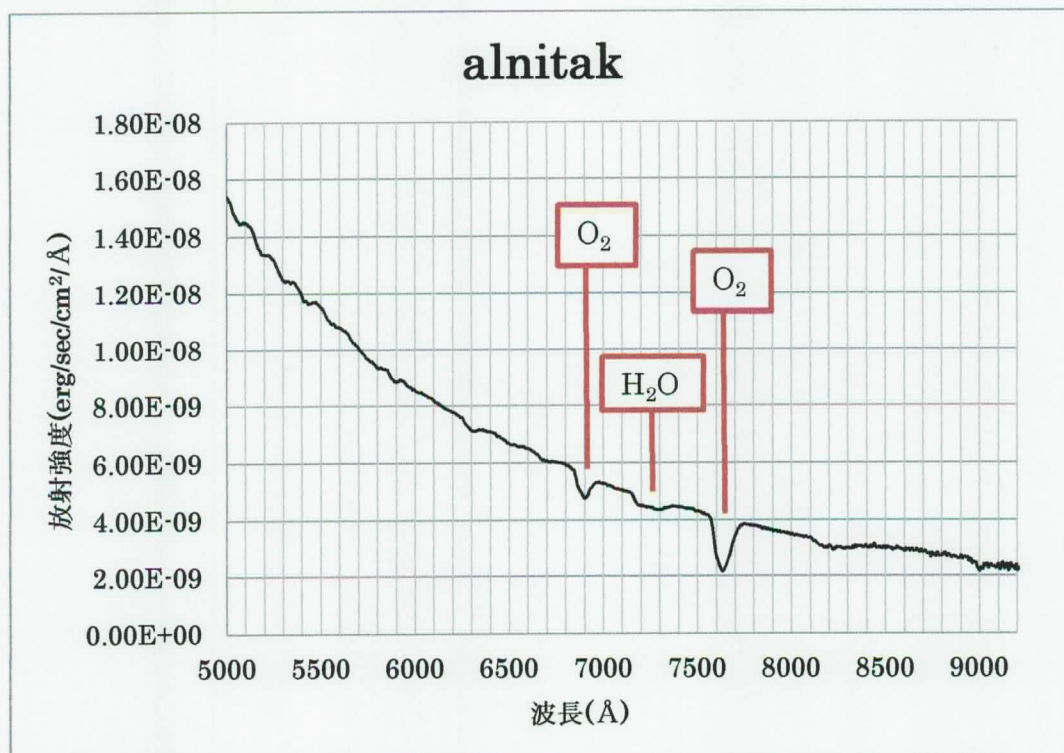
### O 型のスペクトルの特徴

電離ヘリウム、高電離の酸素、窒素、炭素等の線がある。

He II 線が強い(吸収線あるいは輝線)

### O 型巨星

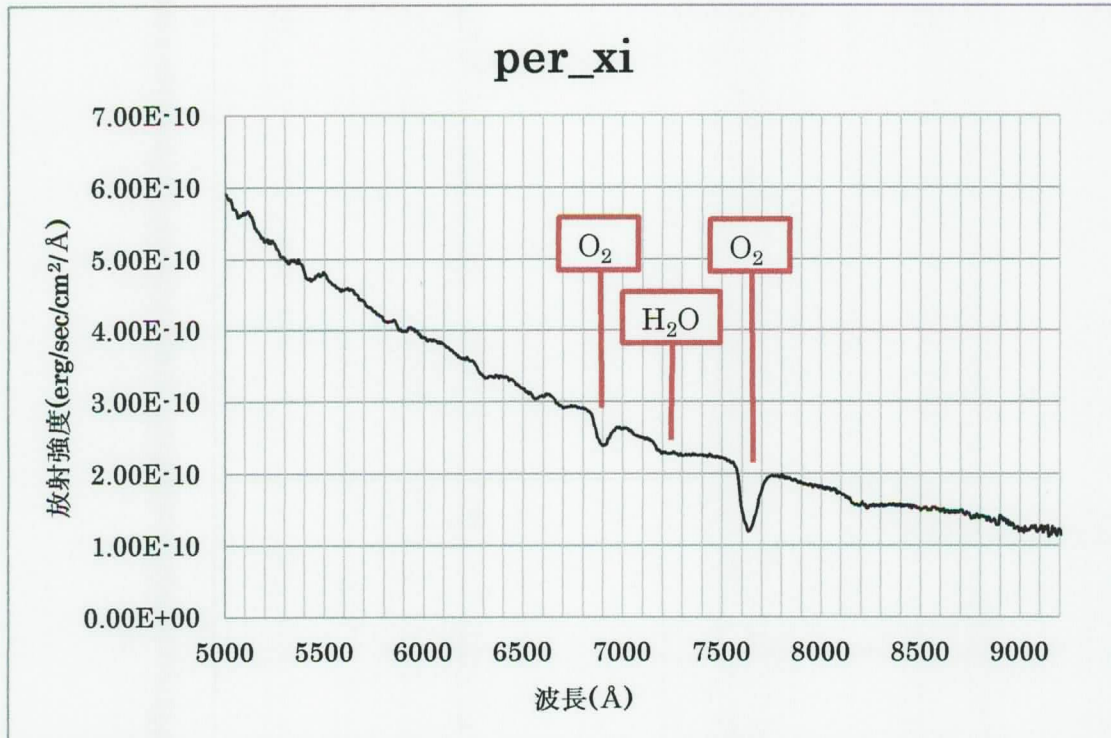
オリオン座 $\epsilon$  (アルニタク) : O9.7Ib



He II の吸収(あるいは輝線)が 4600 Å 付近に見えるはずだが、この波長域では目立つ吸収線は見られない。大気吸収 (O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O) が見える。

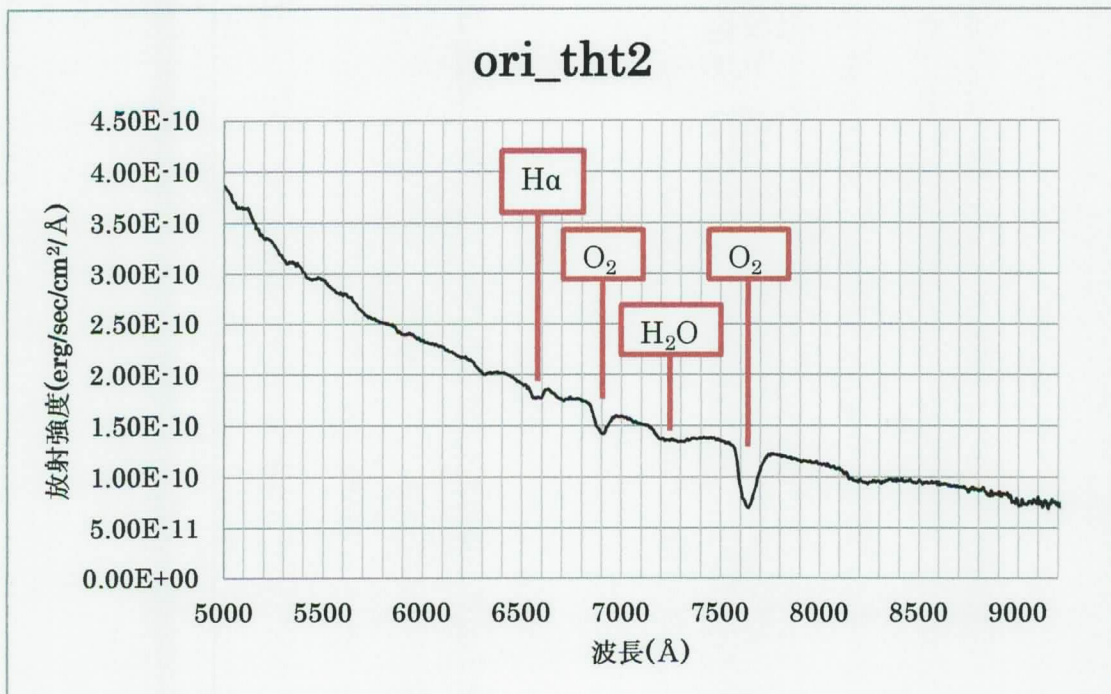


ペルセウス座ξ : O7.5Iab



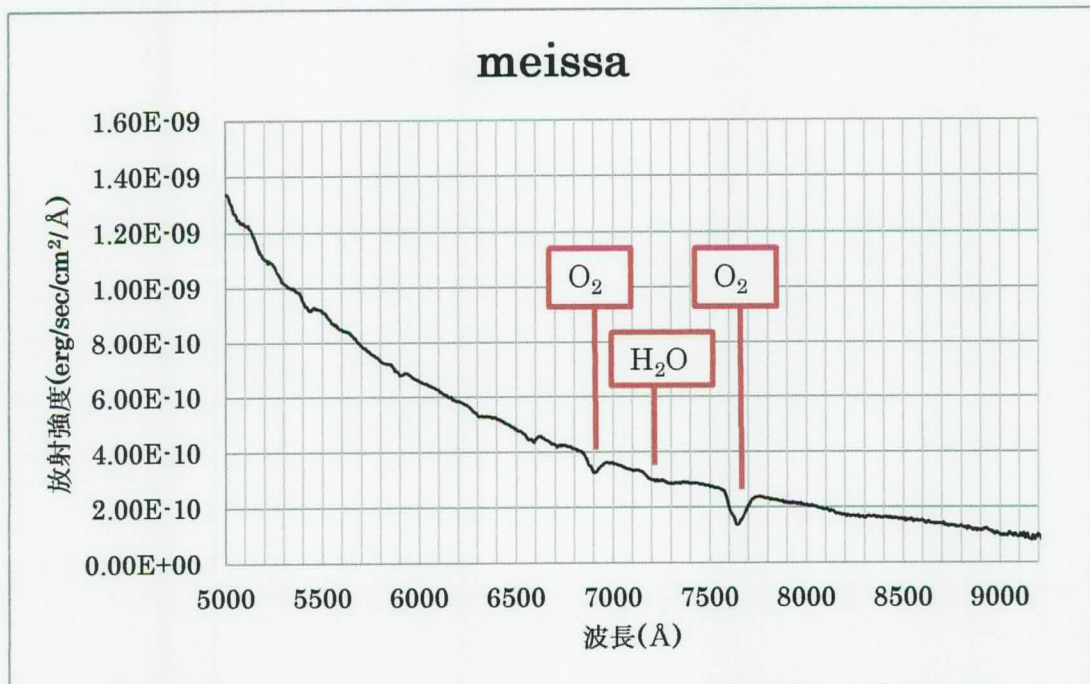
大気吸収が見られる。

オリオン座θ2



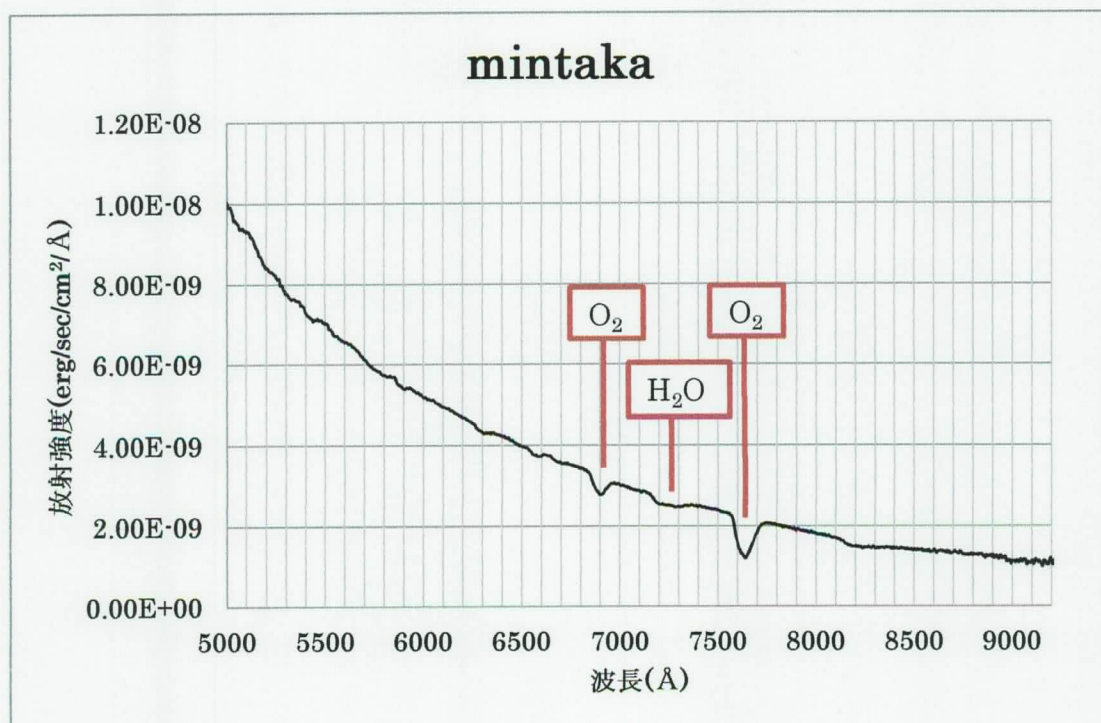
わずかにHα線が見られる。

オリオン座  $\lambda$  (メイサ) : O8III



大気吸収が見られる。

オリオン座  $\delta$  (ミンタカ) : O9.5III



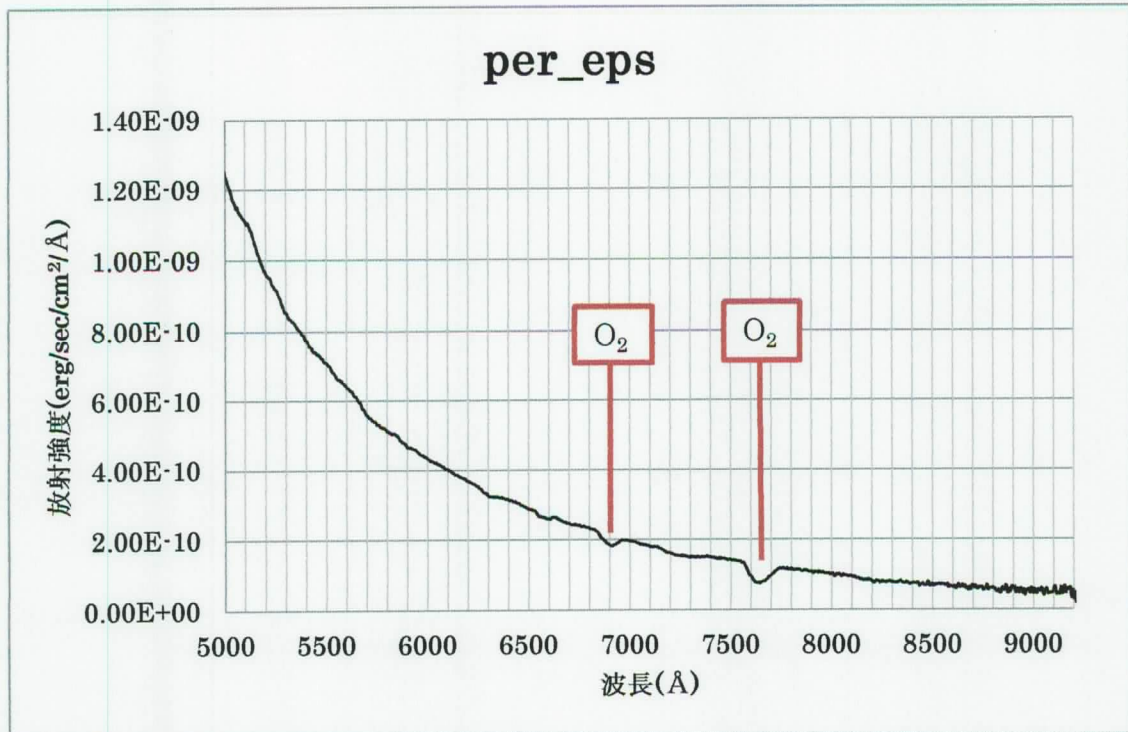
大気吸収が見られる。

### B 型のスペクトルの特徴

H $\alpha$  線が B9 に向かうほど強くなる。HeI 線が強い。

### B 型主系列星

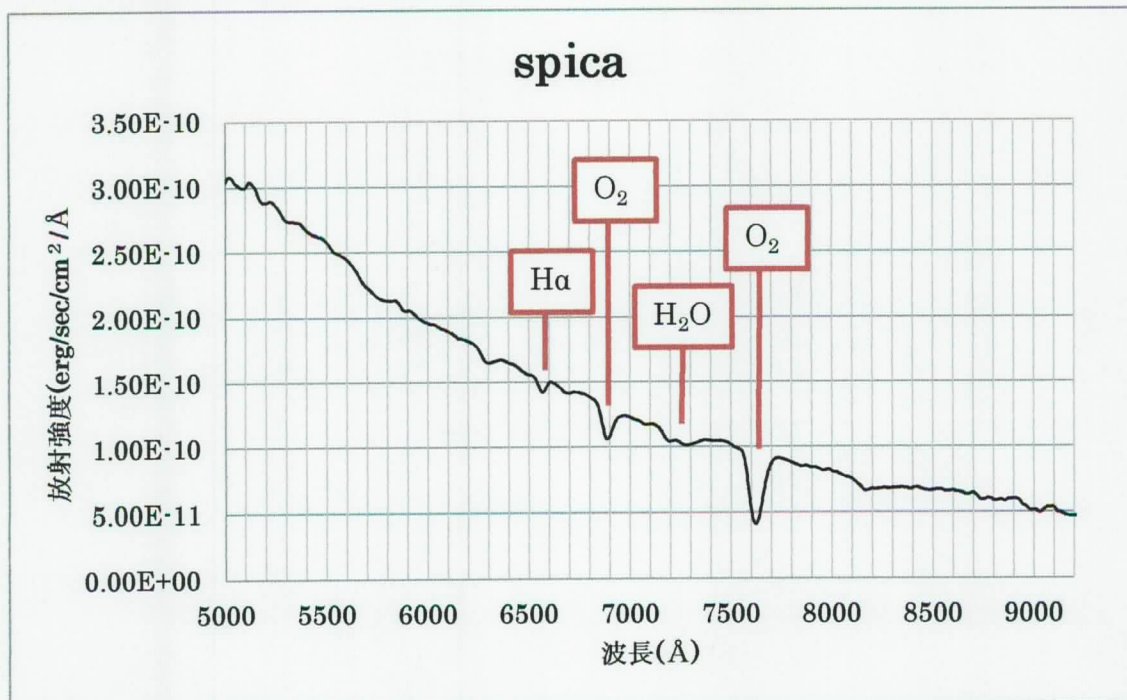
ペルセウス座  $\epsilon$  : B0.5V



この波長域では目立った吸収線は見られない。大気吸収が見られる。



おとめ座  $\alpha$  (スピカ) : B1V



わずかにH $\alpha$ 線が見られる。

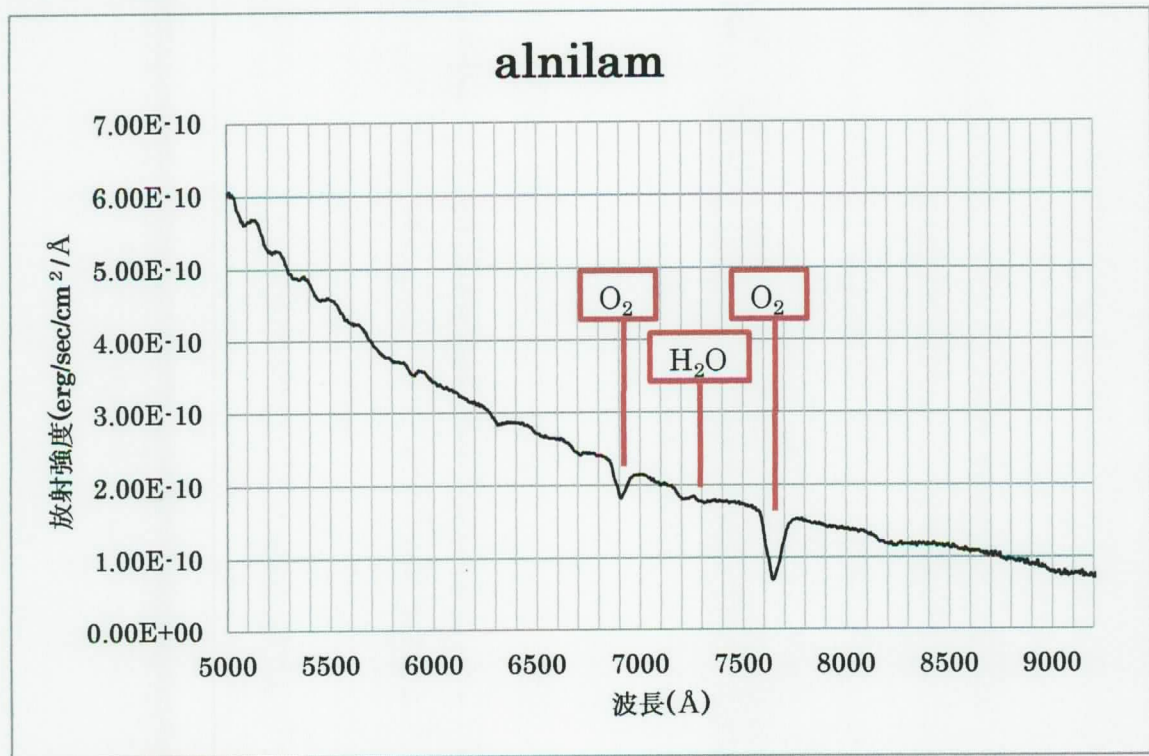
ぎょしゃ座  $\eta$  : B3V



わずかにH $\alpha$ 線が見られる。

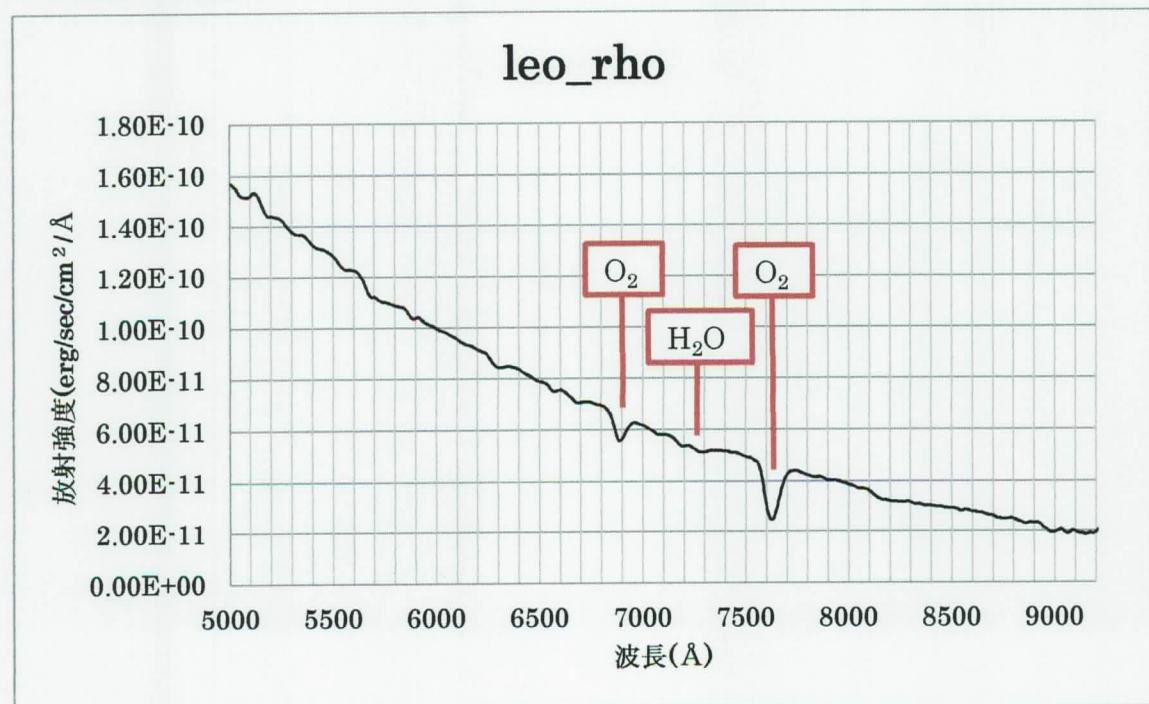
## B 型巨星

オリオン座  $\epsilon$  (アルニラム) : B0Ia

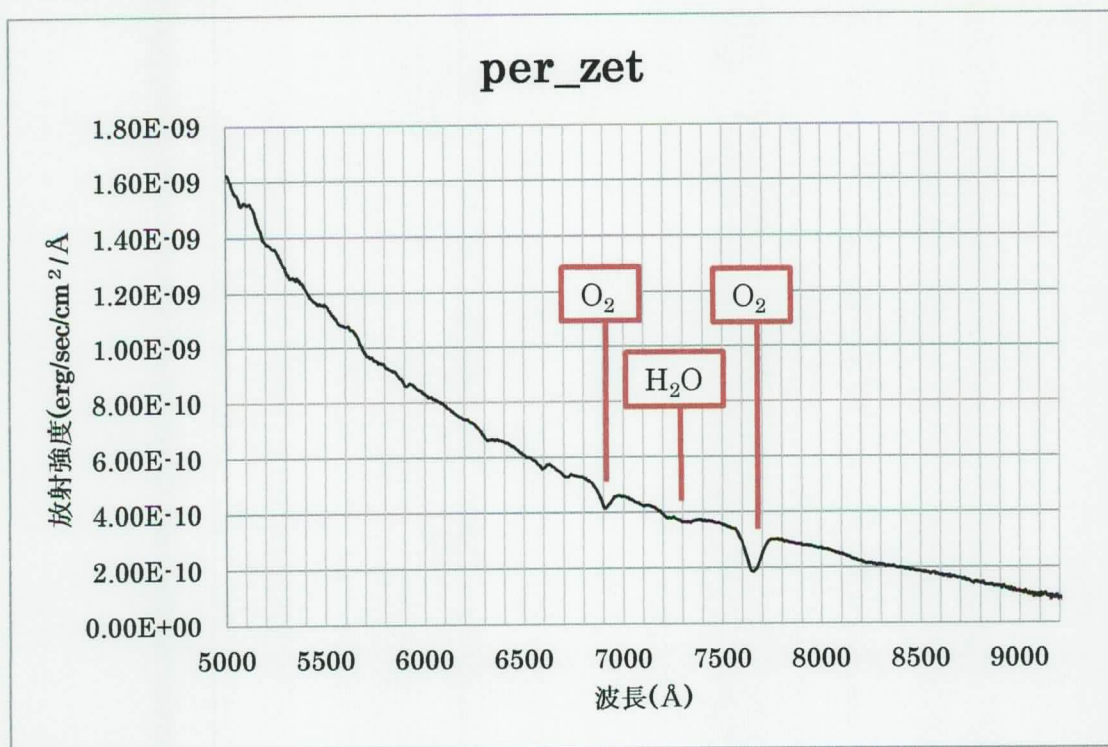


目立った吸収線は見られない。

しし座  $\rho$  : B1Ib



ペルセウス座ζ(メンキブ) : B1Ib



目立った吸収線は見られない。

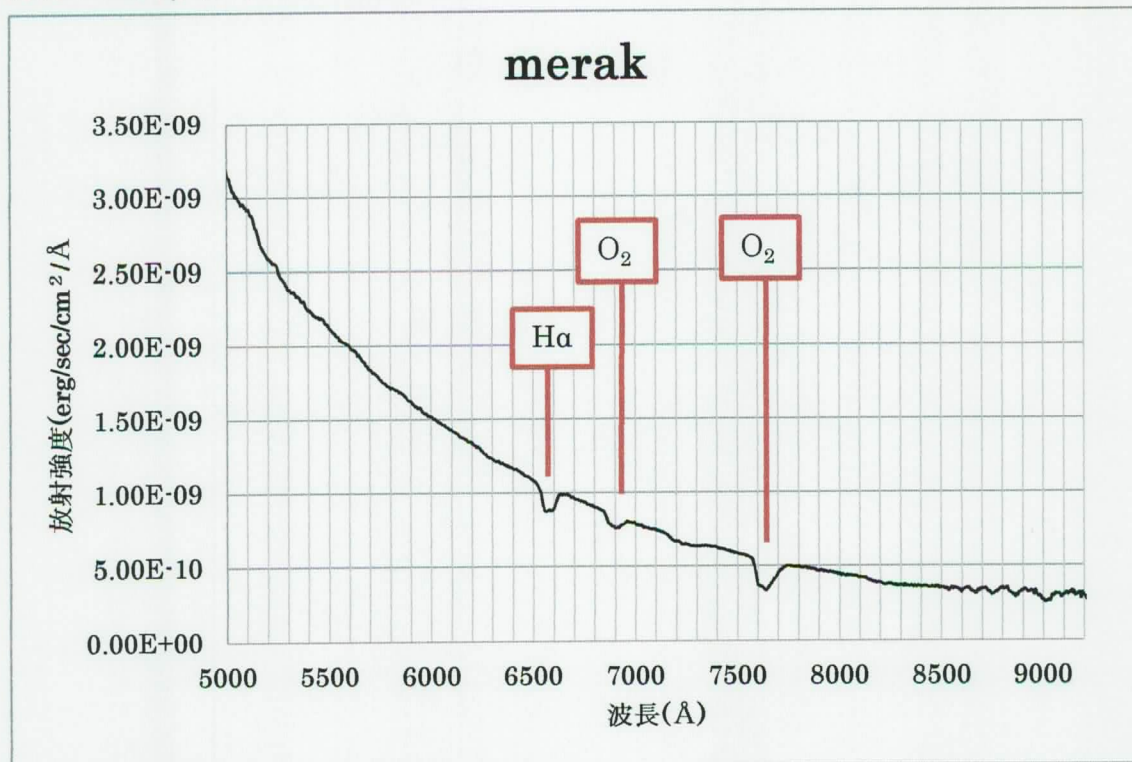


### A 型のスペクトルの特徴

H $\alpha$  線が A2 で最も強くなり、電離金属線も次第に見えてくる。

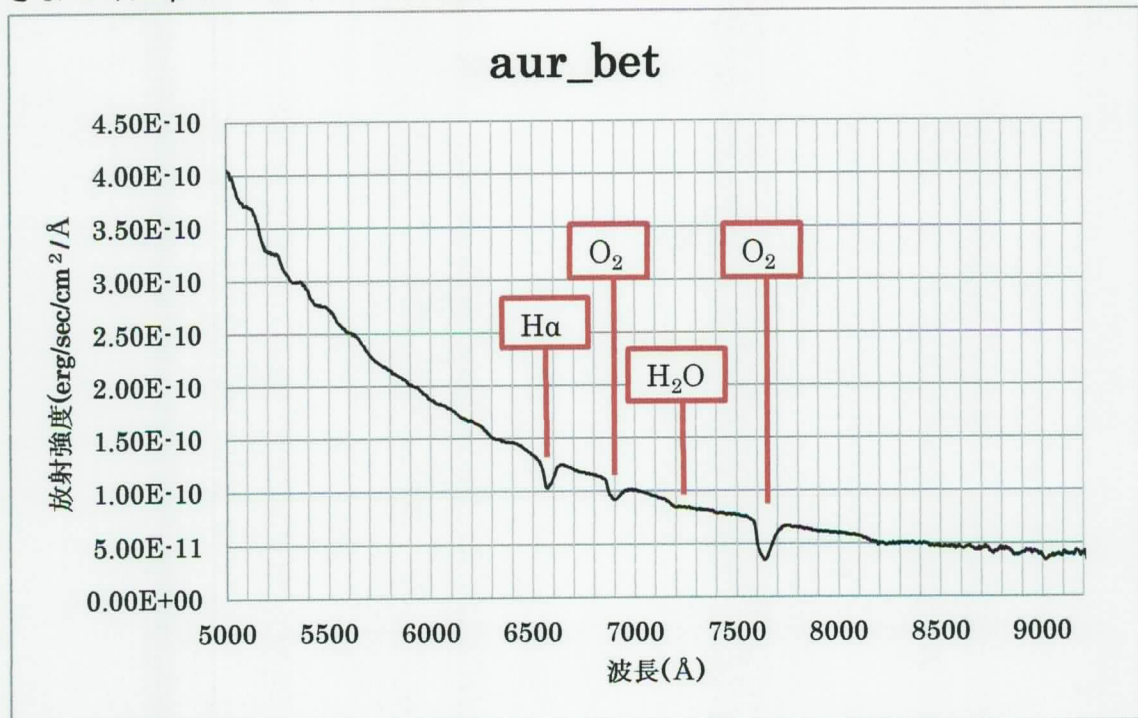
### A 型主系列星

おおいぬ座  $\beta$  (メラク) : A1V



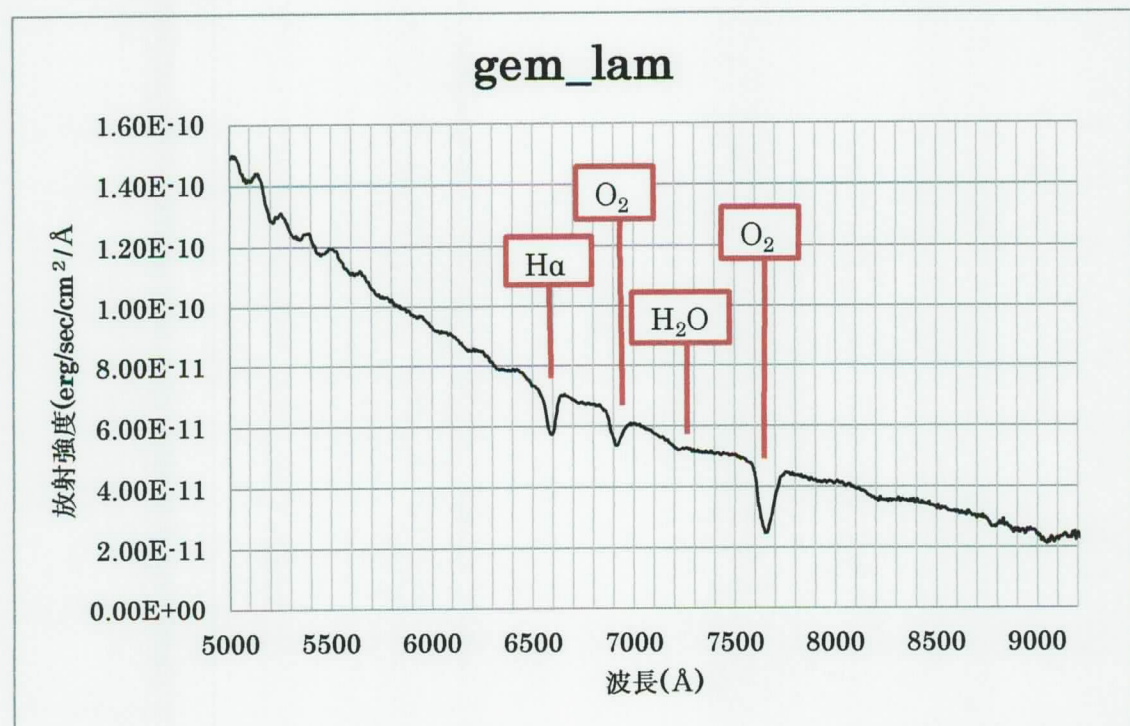
大気吸収のほかに、H $\alpha$  線が強く見られる。

ぎょしゃ座β(メンカリナン) : A2V



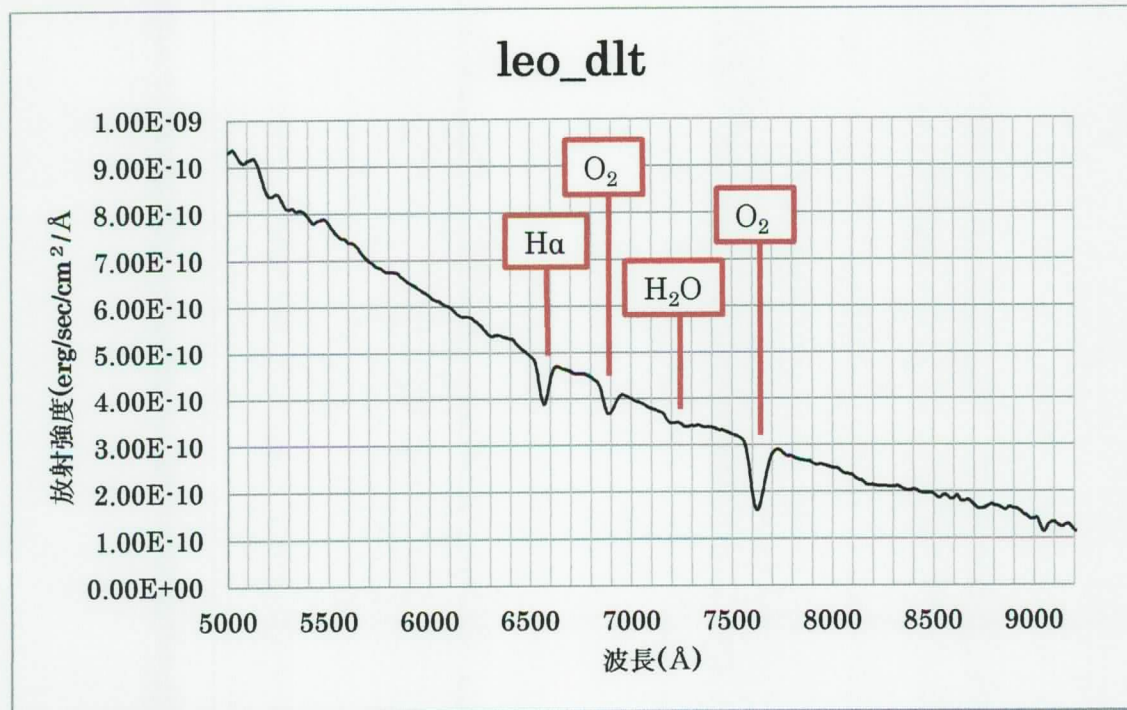
Hα線が強く見られる。

ふたご座λ : A3V



Hα線が強く見られる。

しし座  $\delta$  : A4V

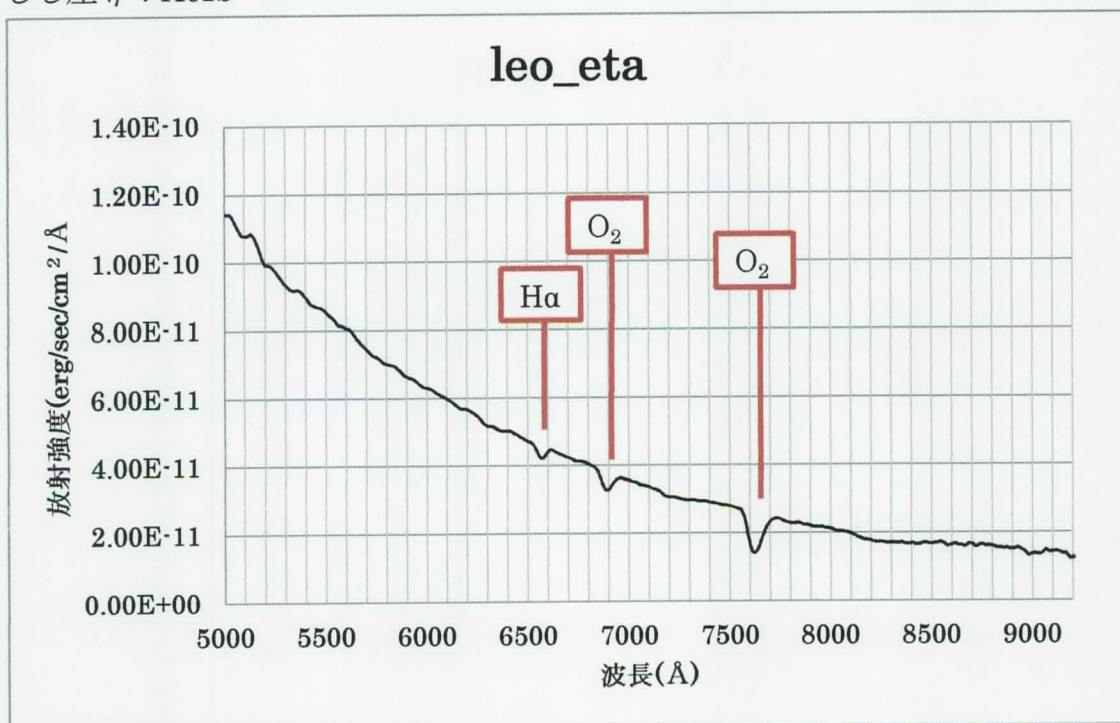


H $\alpha$  線が強く見られる。



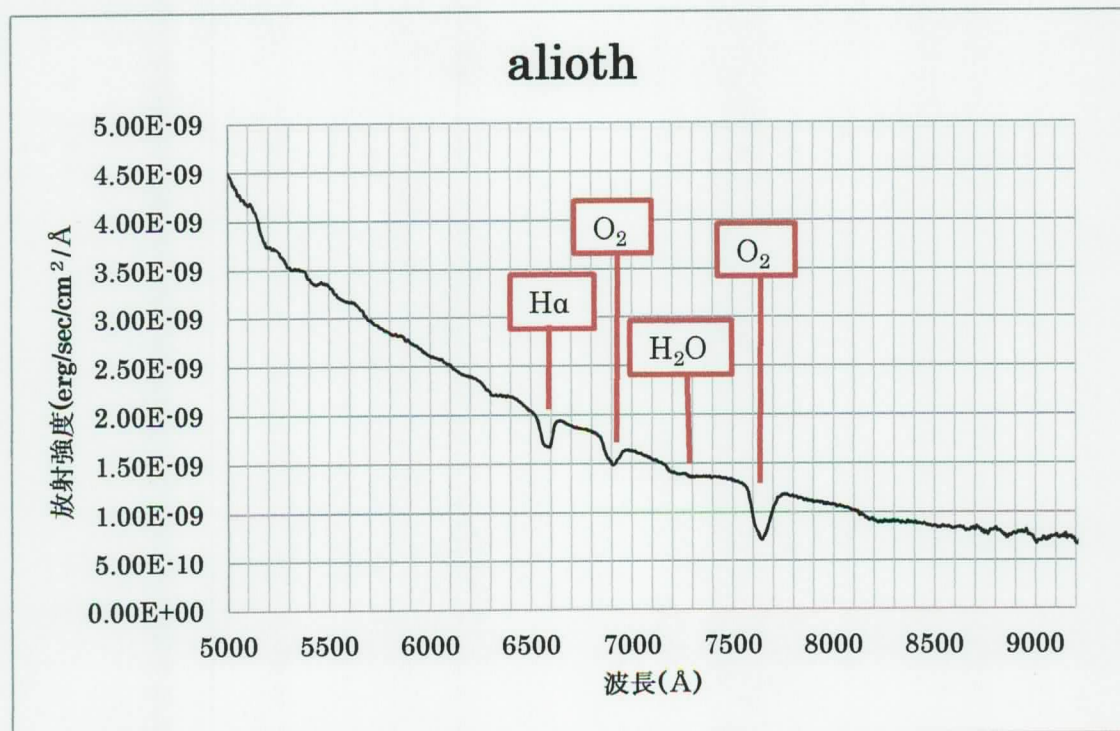
A 型巨星

しし座  $\eta$  : A0Ib

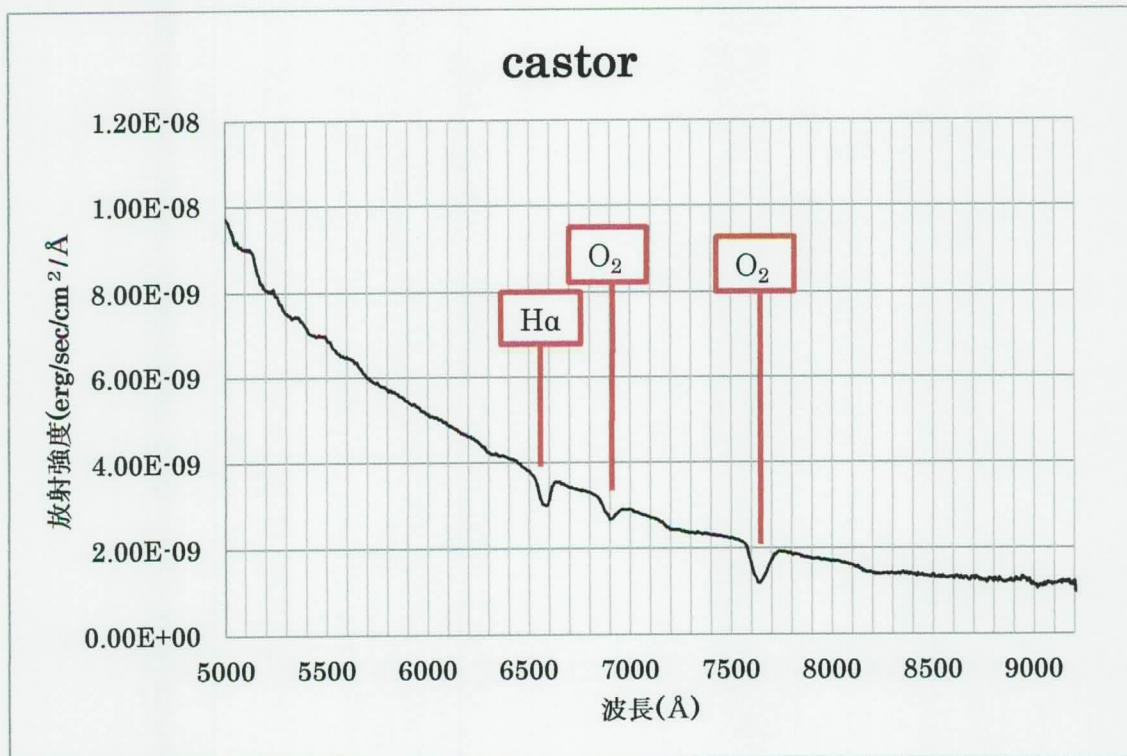


H $\alpha$  線はやや弱く見られる。

おおいぬ座  $\epsilon$  (アリオト) : A0p

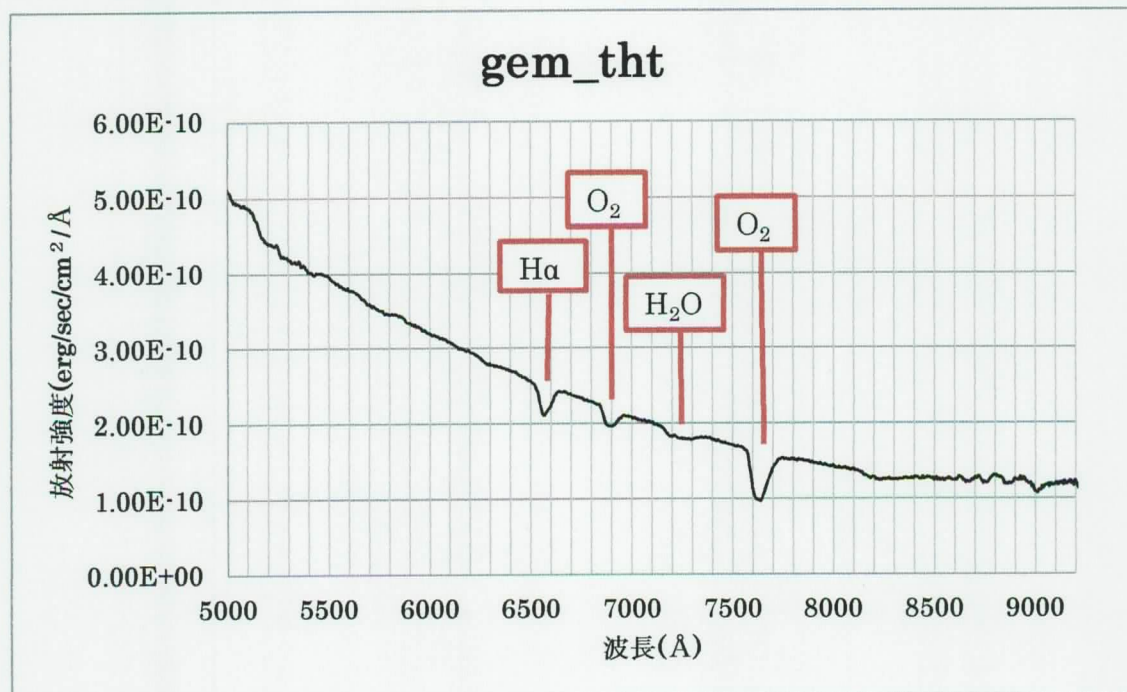


ふたご座  $\alpha$  (カストル) : A2Vm



H $\alpha$  線が強く見られる。

ふたご座  $\theta$  : A3III



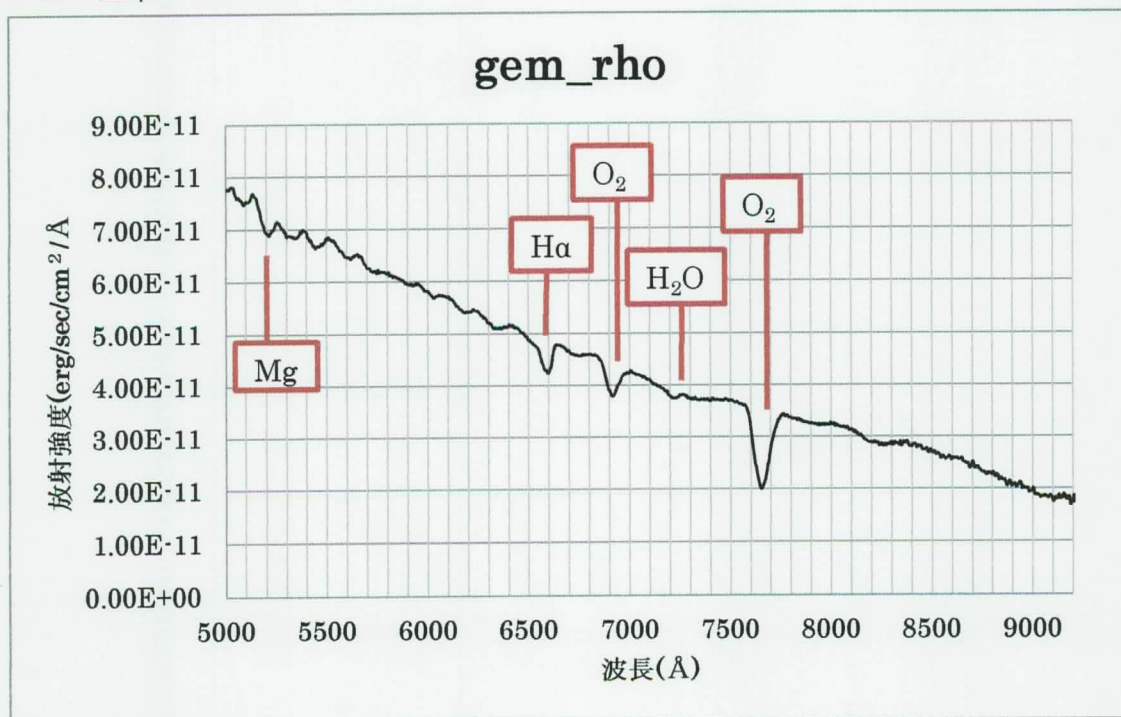
H $\alpha$  線がやや幅広く、強く見られる。

### F 型のスペクトルの特徴

H $\alpha$  線がやや弱まり、カルシウム H、K 線および金属の線が次第に強くなる。

### F 型主系列星

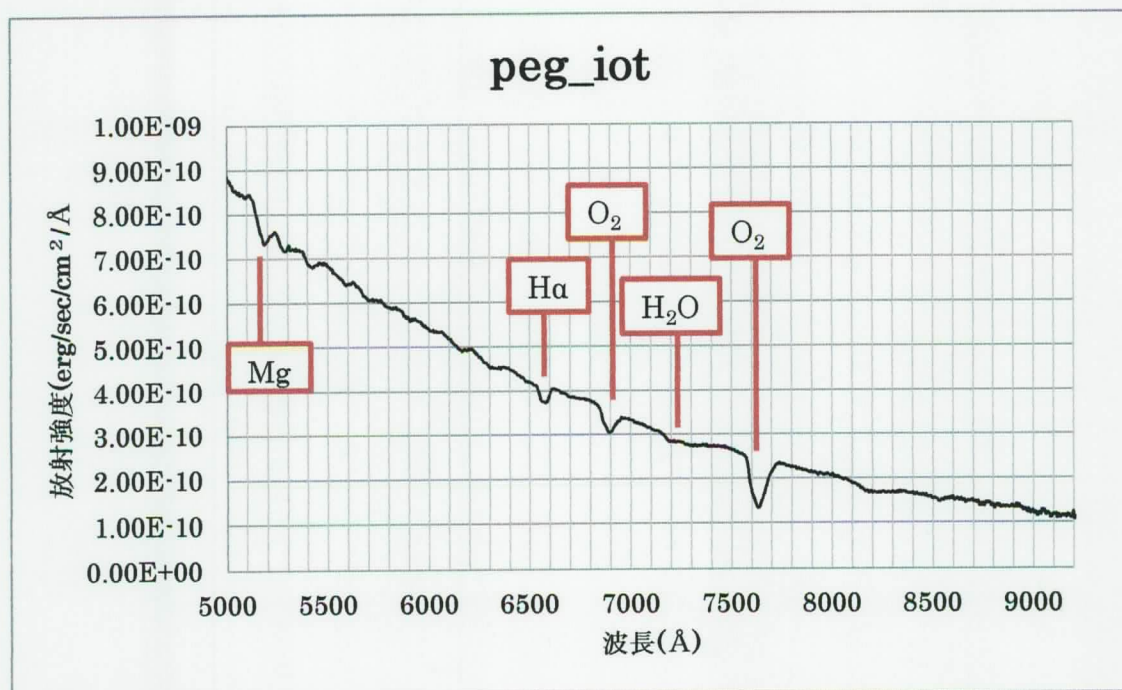
ふたご座  $\rho$  : F0V



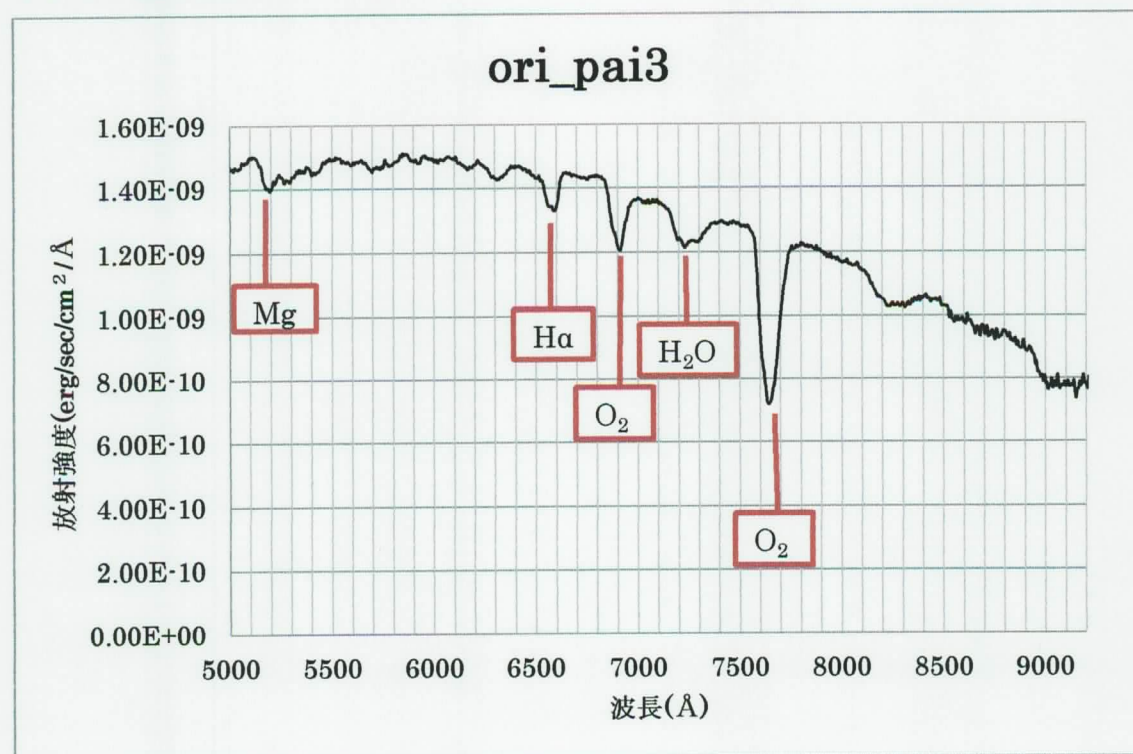
H $\alpha$  線が見え、Mg の吸収線が見えている。



ペガスス座  $\iota$  : F5V

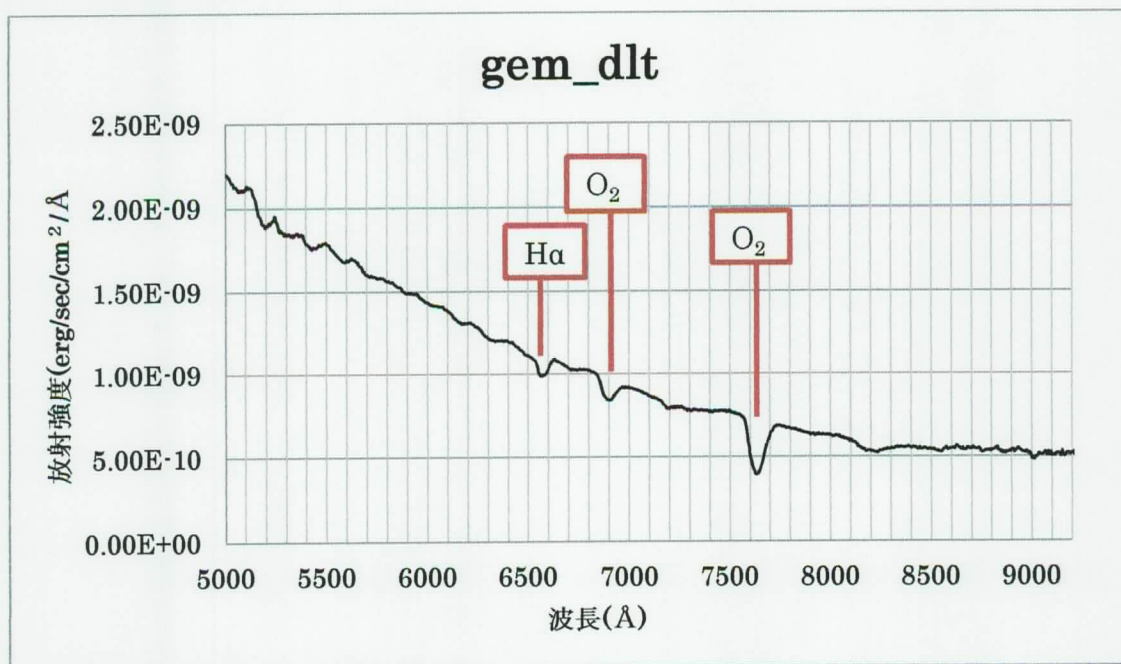


オリオン座  $\pi$  3(タビト) : F5V

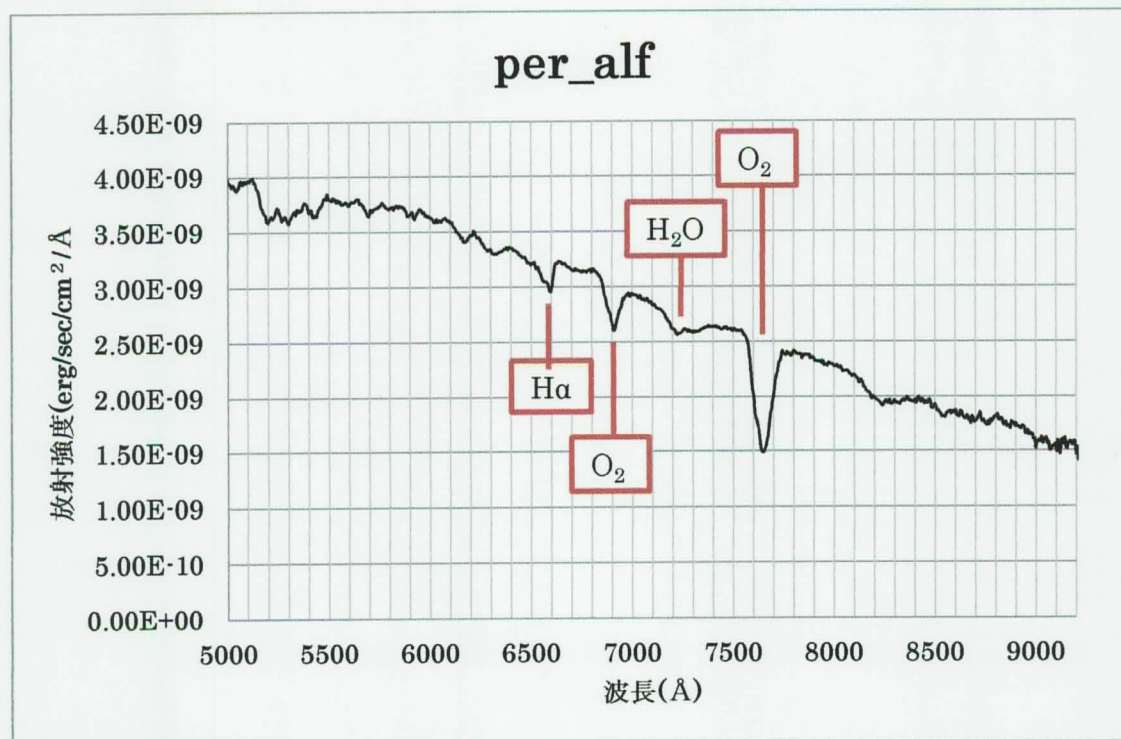


F 型巨星

ふたご座  $\delta$  : F0IV



ペルセウス座  $\alpha$  : F5Ib

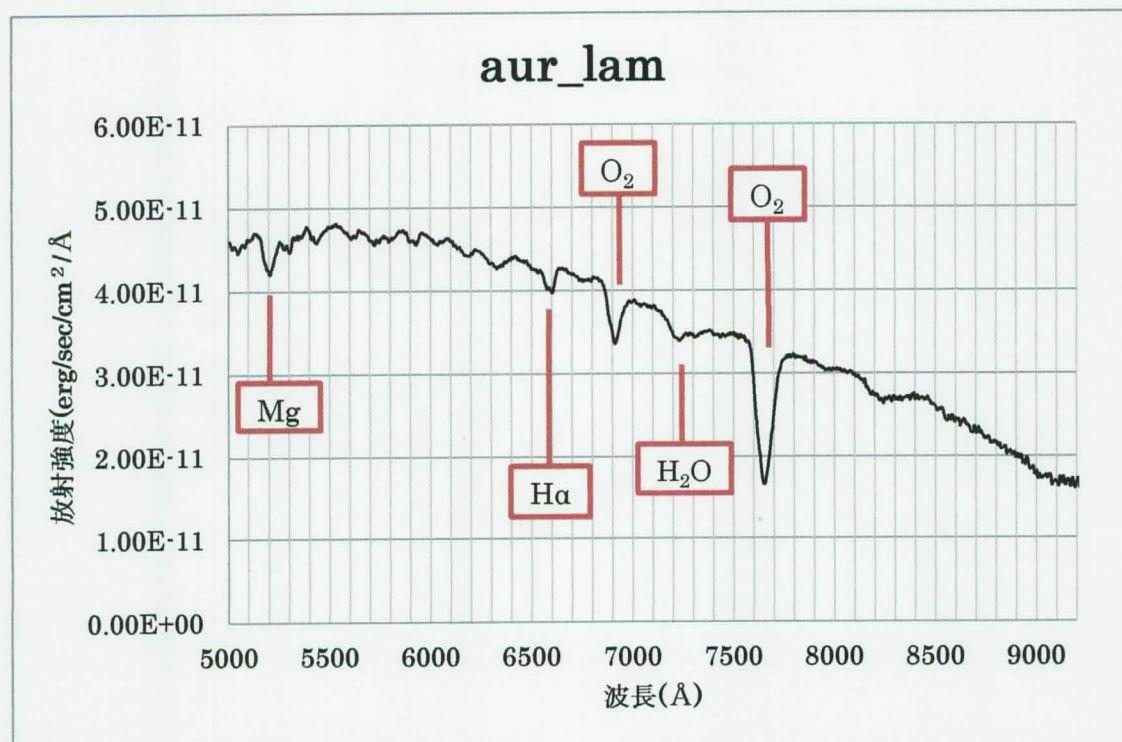


### G 型のスペクトルの特徴

H、K 線が強く、 $H\alpha$  線は目立たなくなる。

G 型主系列星

ぎょしゃ座  $\lambda$  : G0V

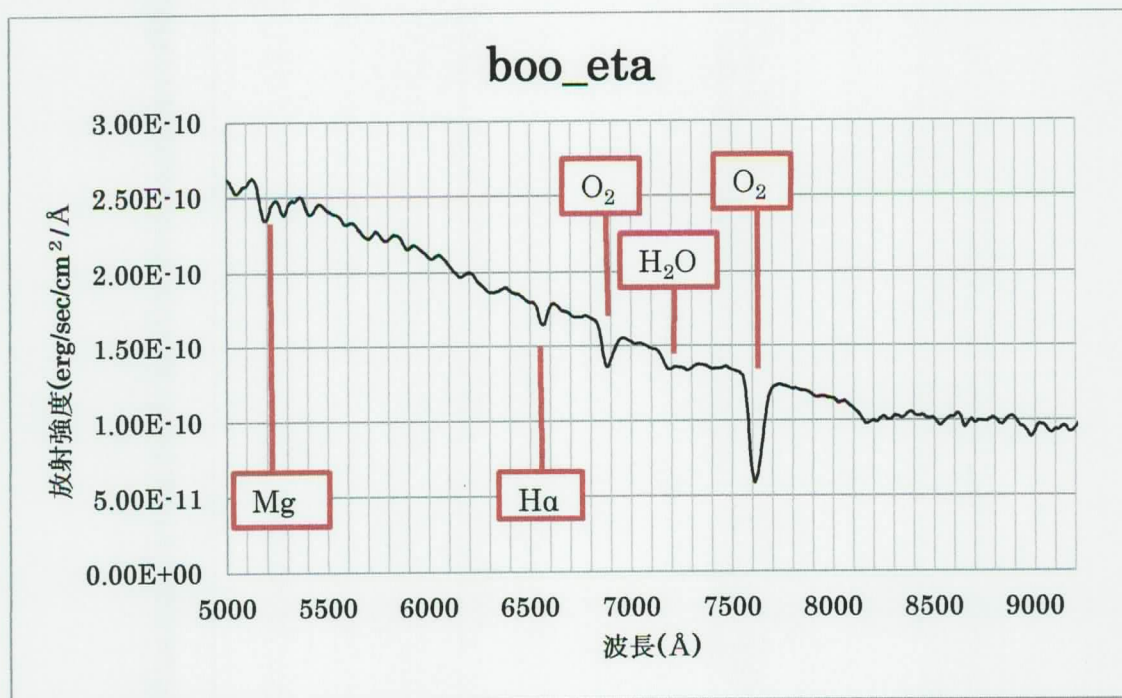


$H\alpha$  線が弱く確認できる。Mg の吸収線が見える。



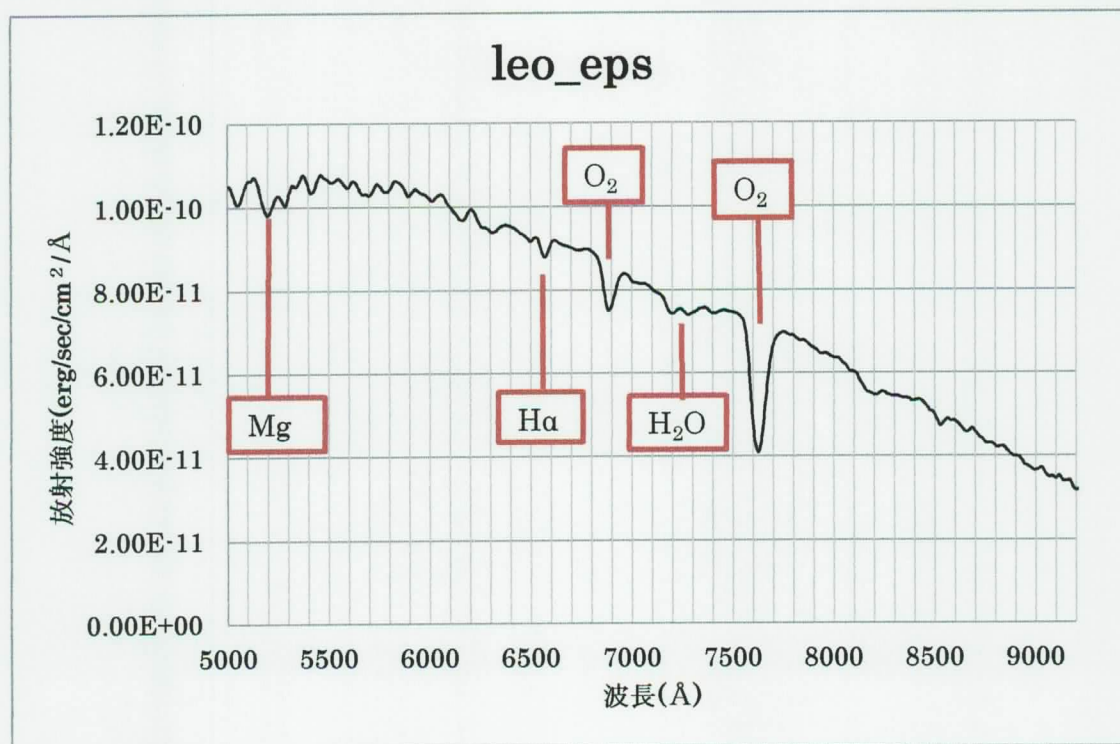
G 型巨星

うしかい座  $\eta$  : G0IV

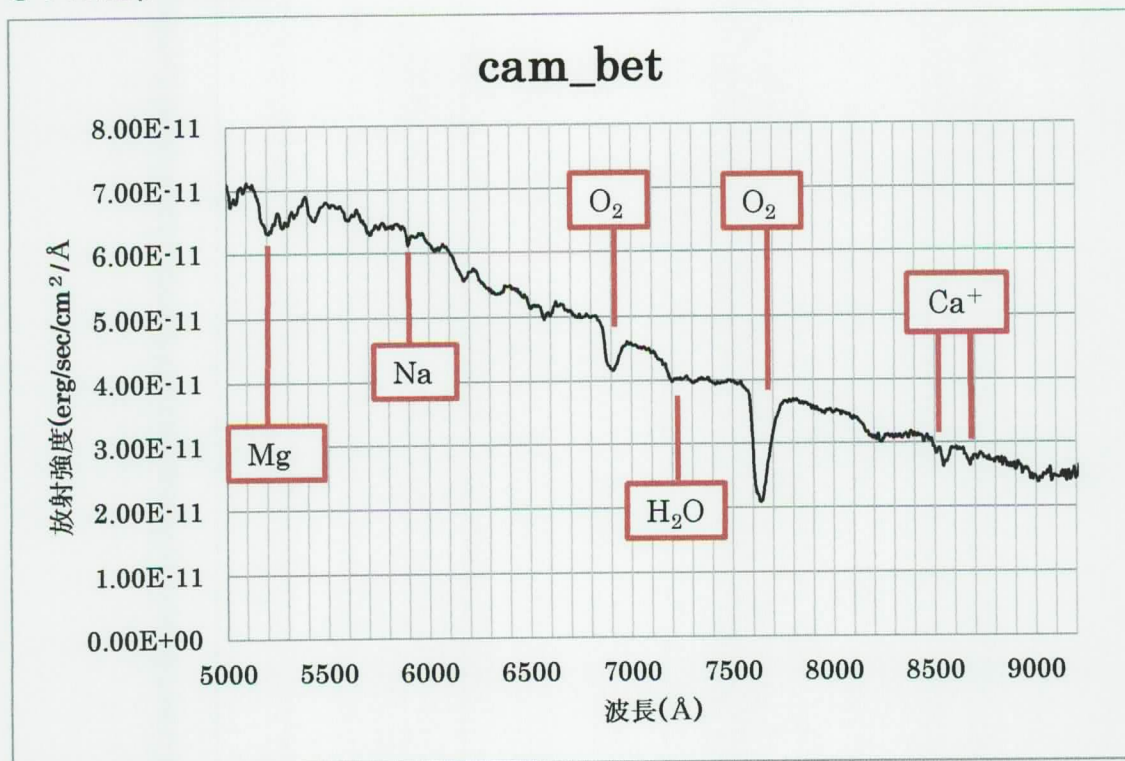


H $\alpha$  線と Mg の吸収が見えている。

しし座  $\epsilon$  (ラス・エラセド・アウストラリス) : G1II



きりん座β : G0Ib



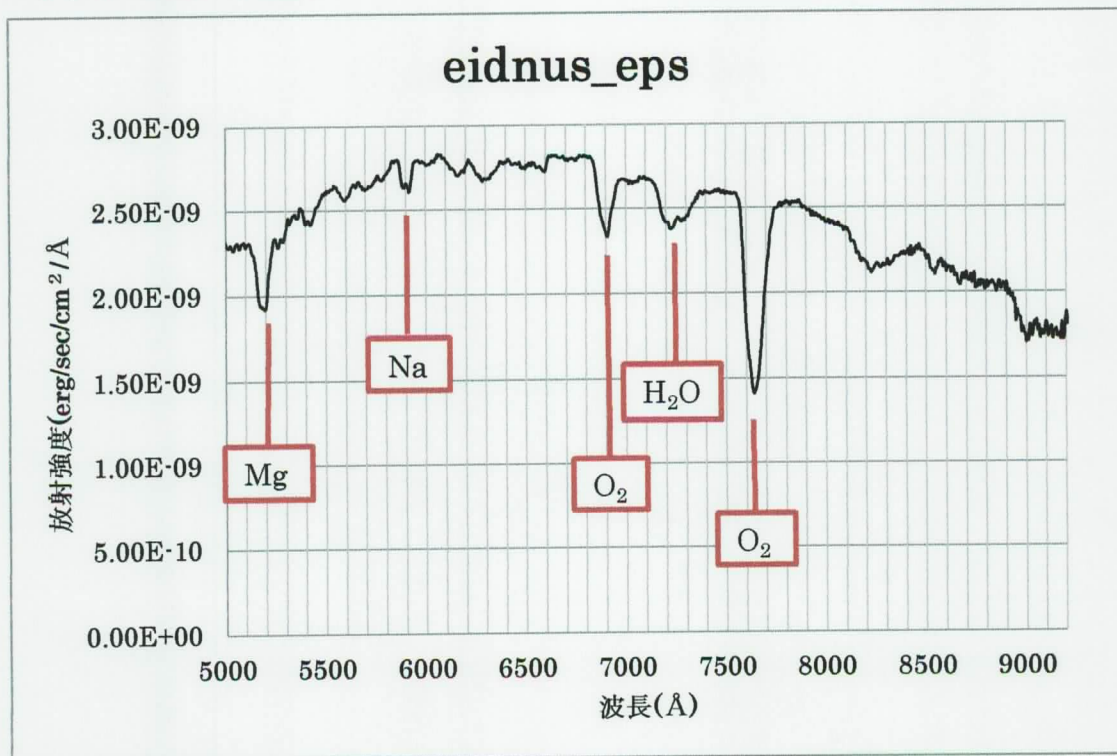
Mg や Na の吸収が見える。H $\alpha$  線はわずかに見える。

### K 型のスペクトルの特徴

H、K 線は強く幅広く、様々な金属線が重なりあう。H $\alpha$  線はほとんど見えなくなる。

### K 型主系列星

エリダヌス座  $\epsilon$  : K2V

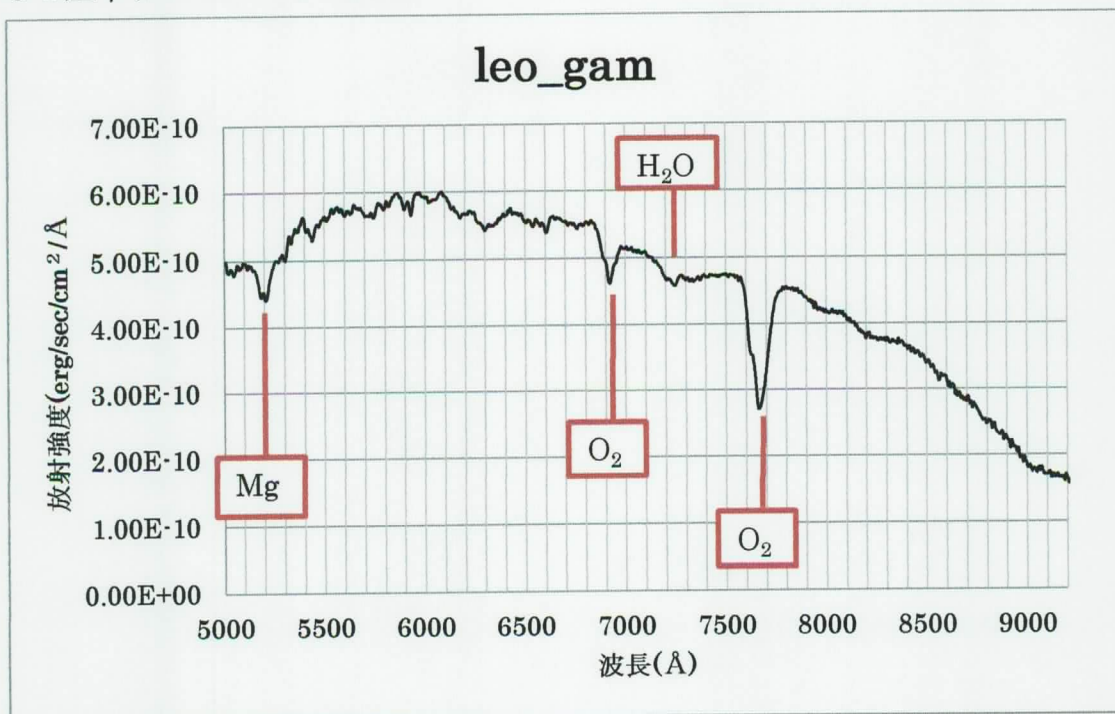


K 型の表面温度を 4000K としてウィーンの変位則に当てはめると、ピークはおよそ 7250Å 付近となる。Na や Mg などの金属の吸収が強く見え始める。H $\alpha$  線は見えなくなっている。



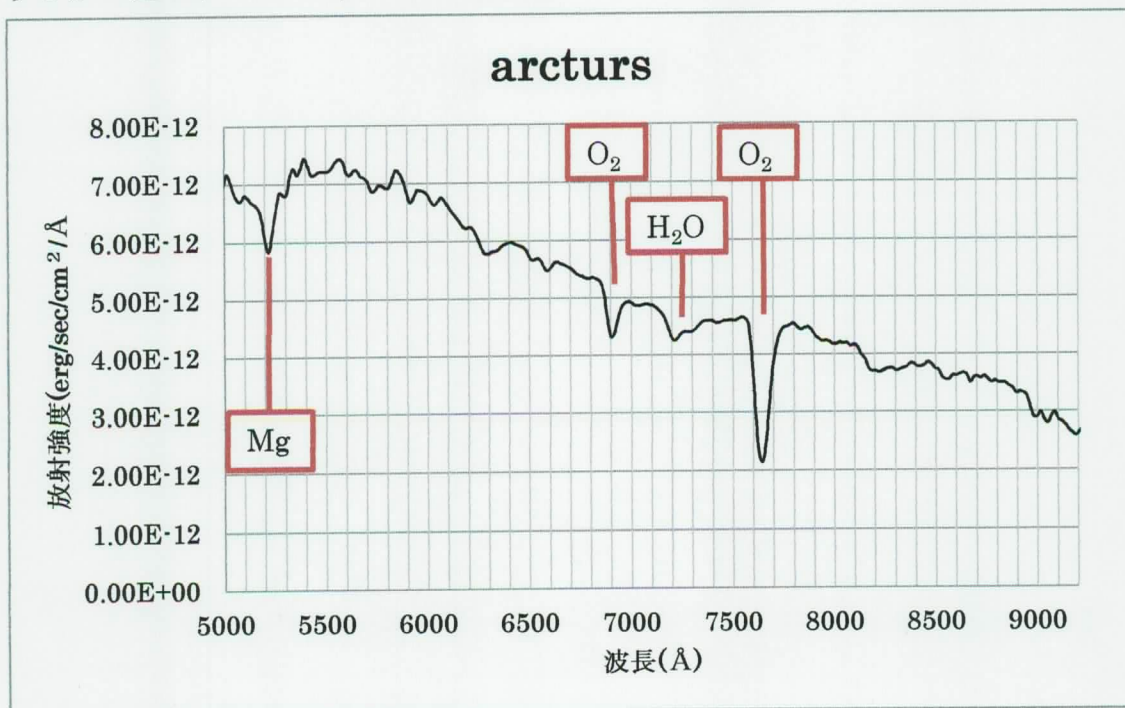
K 型巨星

しし座  $\gamma$  (アルギエバ) : K0III



Na や Mg などの金属の吸収が強く見えている。

うしかい座  $\alpha$  (アークトゥルス) : K1.5III



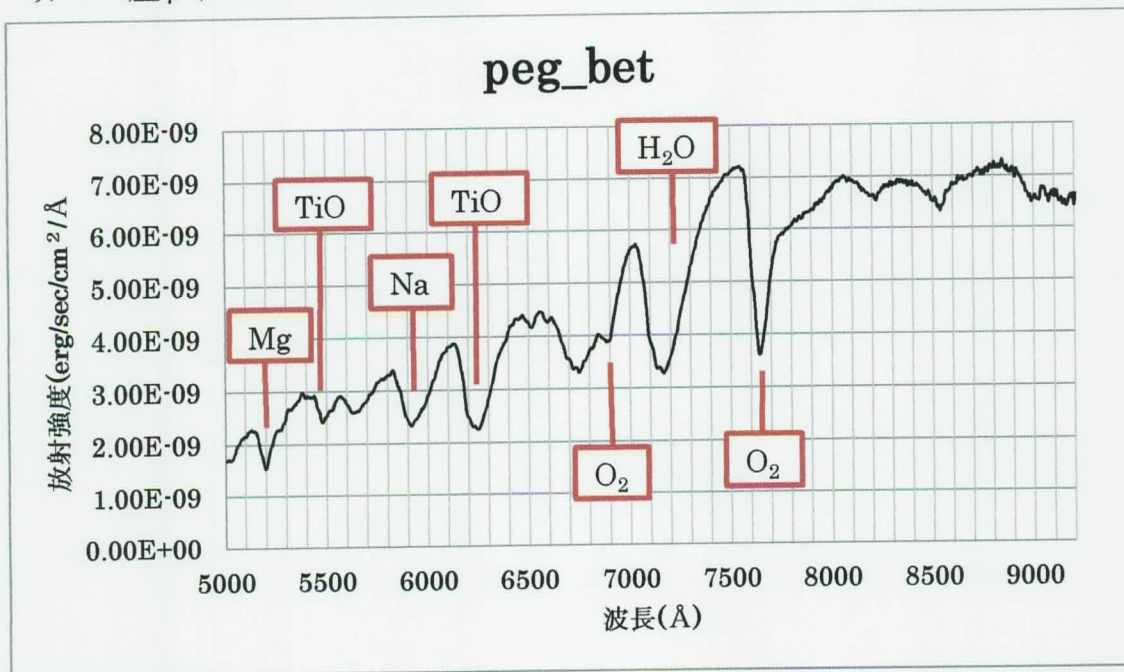
Na や Mg などの金属の吸収が強く見えている。

### M 型のスペクトルの特徴

中性金属線が非常に強くなり、M5 にかけて TiO 分子吸収帯も強く現れる。

### M 型巨星

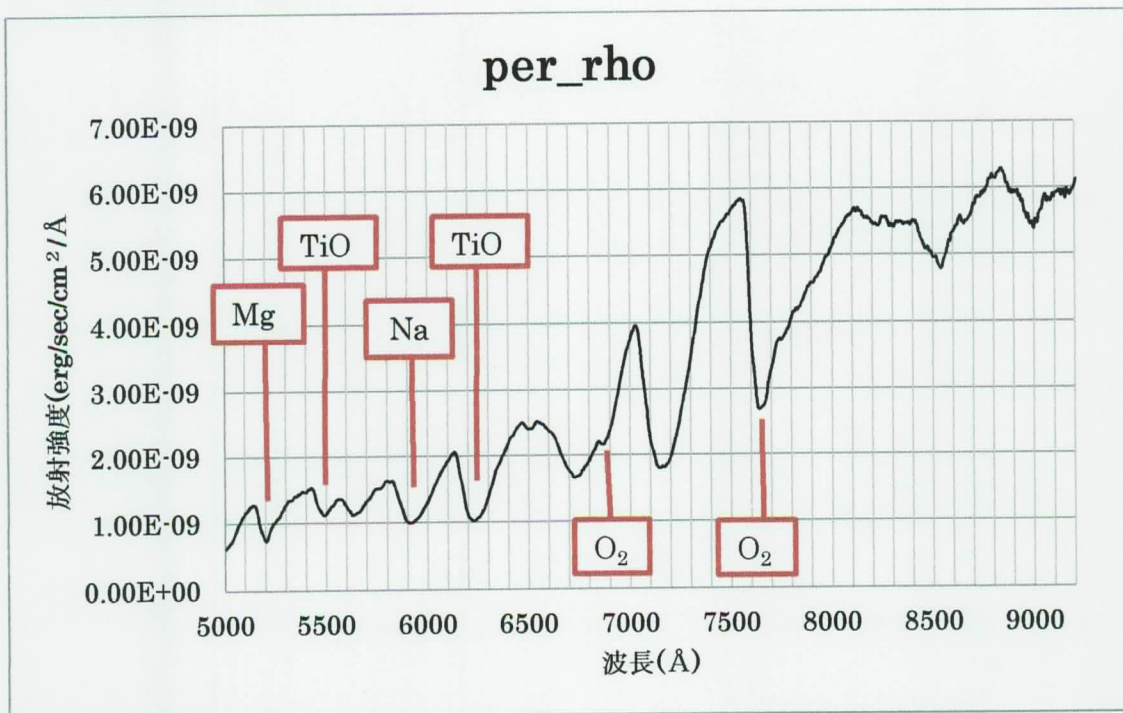
ペガサス座  $\beta$  (シェアト) : M2 II - III



M 型の表面温度をおよそ 3000K としてウィーンの変位則に当てはめると、ピークはおよそ 9700 Å 付近となる。このデータでもピークは長波長側にずれ右上がりのグラフになっている。

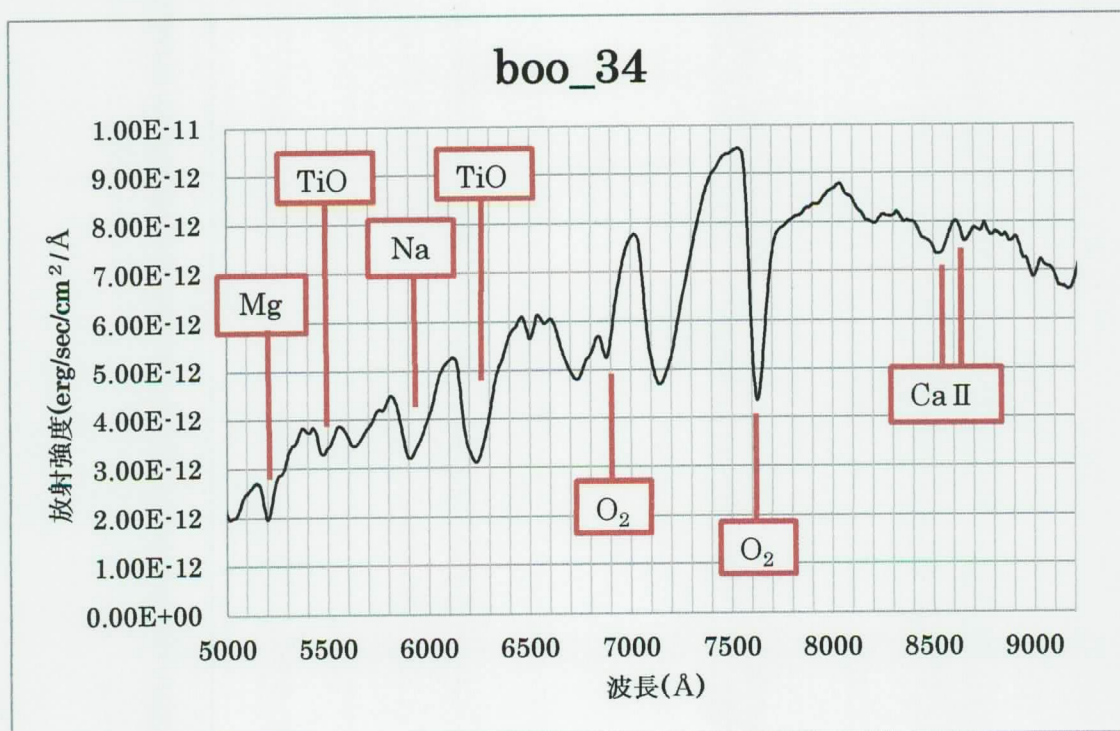
TiO 分子吸収帯や中性金属線が現れている。Na の吸収が幅広くなっているのは TiO 分子吸収帯と重なっているためである。

ペルセウス座  $\rho$  : M3III



TiO 分子吸収帯や中性金属線が現れている。

うしかい座 34 番星 : M3III

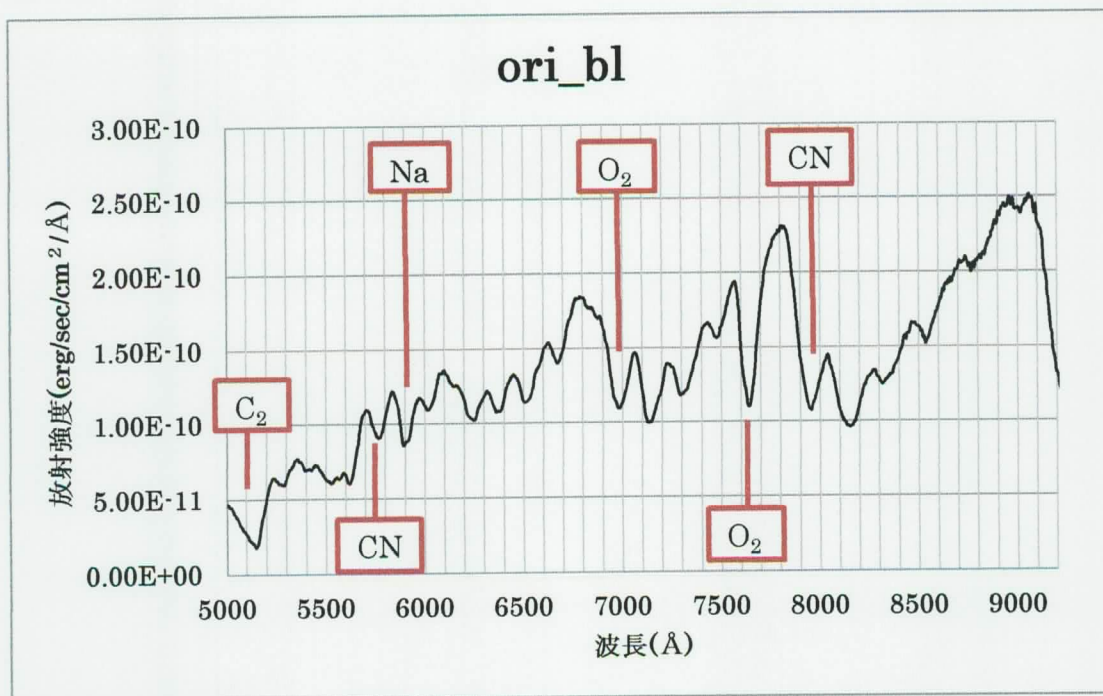


TiO 分子吸収帯や中性金属線が現れている。



オリオン座 BL 星

炭素星：C



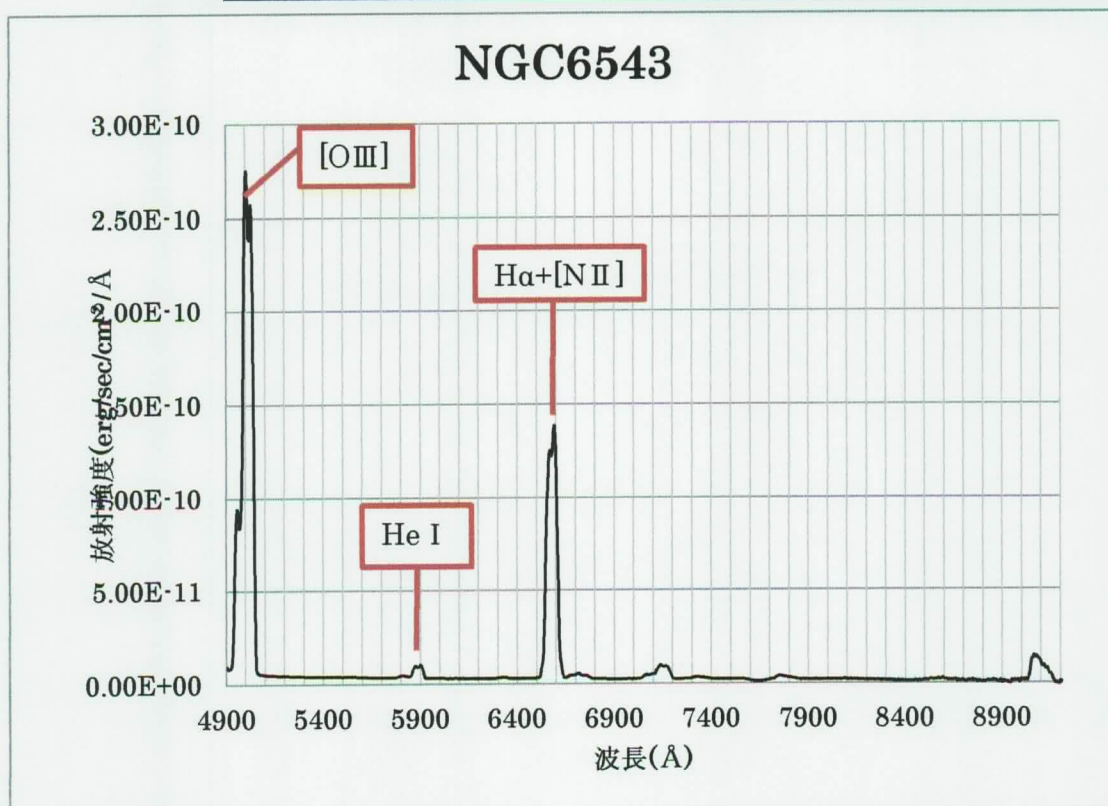
炭素星は表面温度は K・M 型と同じくらいだが、炭素化合物を多く含んでいる。スペクトルには C<sub>2</sub> 分子によるバンドや CN などの炭素化合物の吸収線が見られる。

キャッツアイ星雲(NGC6543)



|      |                |
|------|----------------|
| 観測日  | 11/12/04 pirka |
| 星座   | りゅう座           |
| 実視等級 | 8.1 等          |
| 距離   | 3600 光年        |

<http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-2004-27-a-full.jpg>



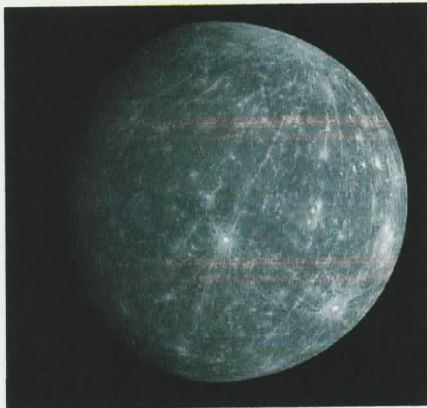
主に外層の電離ガスから輝線スペクトルが得られ、 $H\alpha$  線と酸素や窒素の禁制線が見られる。

禁制線…ガス中のイオンの基底準位にある電子が自由電子と衝突して励起された後、もとの準位に戻る時に放射する輝線スペクトルを禁制線と言う。選択則で許されていない遷移のため遷移確率が極めて低く、通常的气体中ではすぐに別の自由電子や原子と衝突して基底準位に戻ってしまうために観測することはできないが、密度が非常に小さい星間空間では衝突が起こる間隔が長いために放射遷移が起こり禁制線が観測できる。

※(理科年表オフィシャルサイト(国立天文台)：柴田克典 国立天文台 (2008 年 7 月) 天文部 > 惑星状星雲)

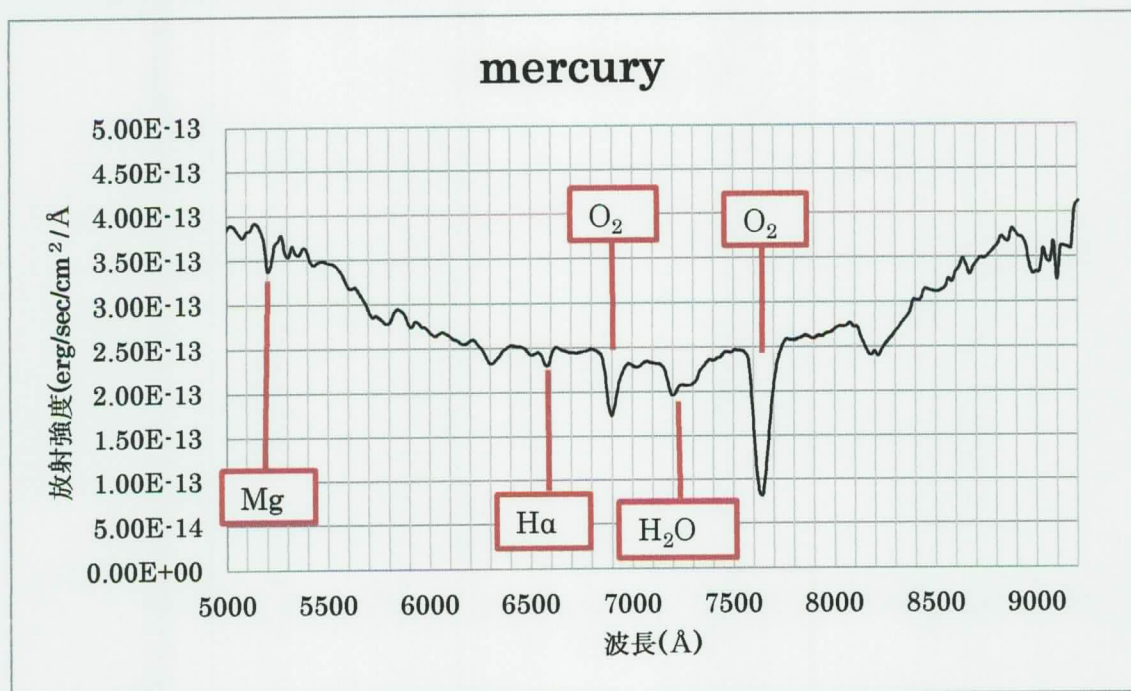


## 水星



|         |                           |
|---------|---------------------------|
| observe | 11/12/18 pirka            |
| 反射能     | 0.06                      |
| 有効温度(K) | 530                       |
| 大気圧     | $10^{-15}$ bar            |
| 大気組成    | 酸素<br>ナトリウム<br>水素<br>ヘリウム |

<http://spaceinfo.jaxa.jp/files/15509.jpg>



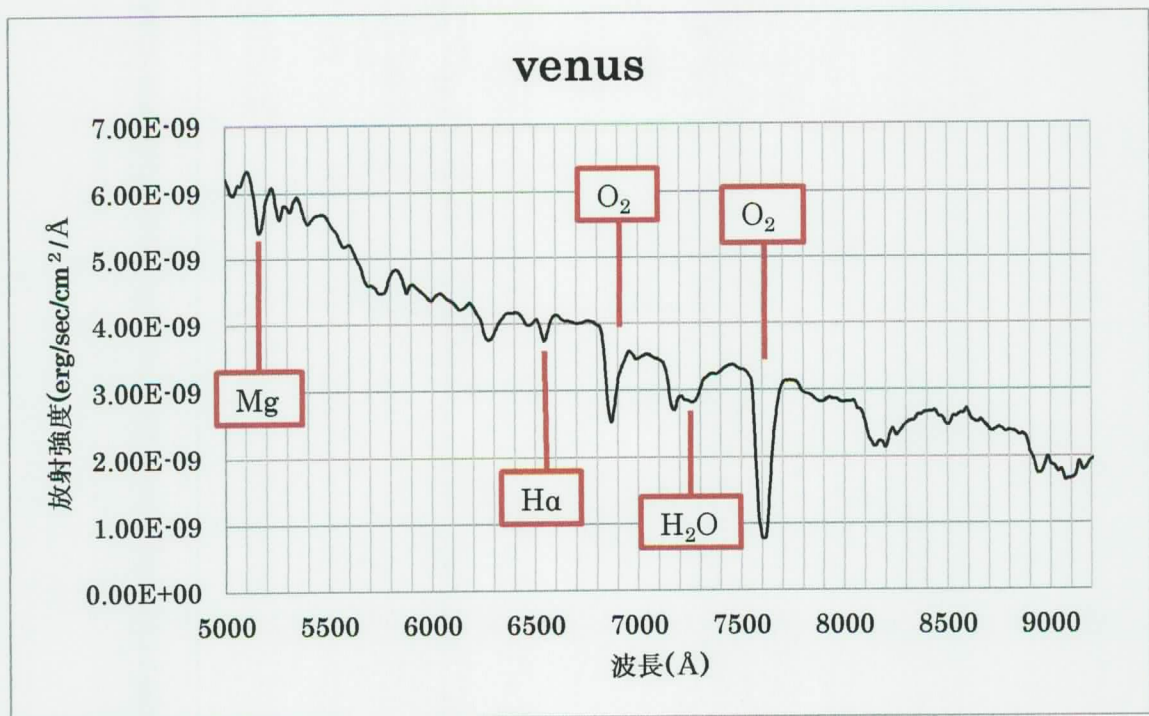
水星は明け方にあがってきたため、薄明の中、高度 10° 以下での撮影となった。  
Background に太陽光が入ってしまっており、大気減光の影響も強い。  
アルベドは低い、大気が希薄なためほぼそのまま太陽の光は反射される。

## 金星



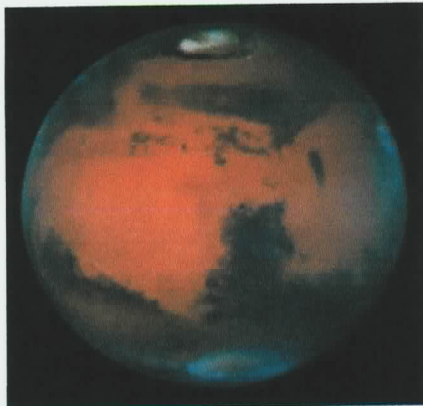
|         |                           |
|---------|---------------------------|
| 観測日     | 11/12/20 50cm             |
| 反射能     | 0.78                      |
| 有効温度(K) | 240                       |
| 大気圧     | 90 bar                    |
| 大気組成    | 二酸化炭素<br>窒素<br>水<br>二酸化硫黄 |

<http://spaceinfo.jaxa.jp/files/15745.jpg>



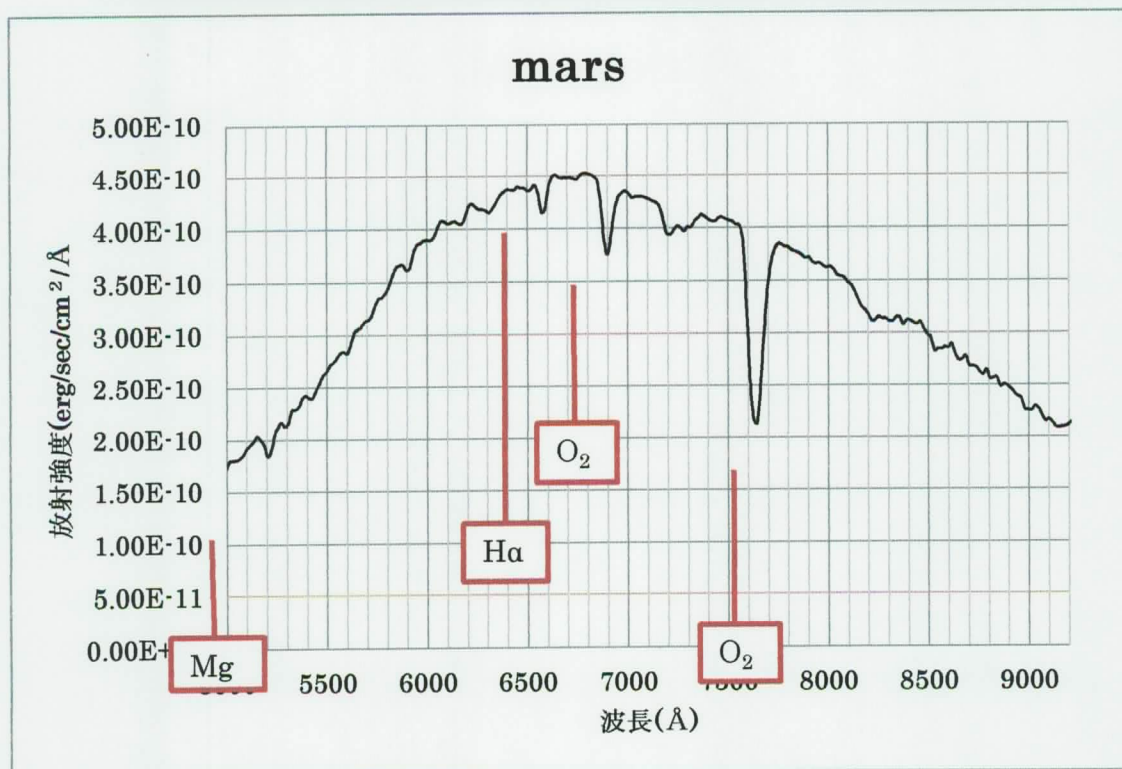
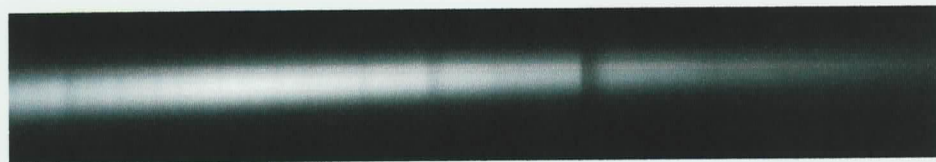
金星表面は濃い大気に覆われ、高いアルベドを示す。厚い雲によって太陽の光はほぼそのまま反射される。金星大気に含まれる CO<sub>2</sub> による吸収線は近赤外～赤外域で見られる。

## 火星



|         |               |                      |
|---------|---------------|----------------------|
| 観測日     | 11/12/4 pirka |                      |
| 反射能     | 0.16          |                      |
| 有効温度(K) | 250           |                      |
| 表面大気圧   | 0.006 bar     |                      |
| 大気組成    | 二酸化炭素         | 95                   |
|         | 窒素            | 2.7                  |
|         | アルゴン          | 1.6                  |
|         | 酸素            | $1.3 \times 10^{-1}$ |
|         | 一酸化炭素         | $7 \times 10^{-2}$   |

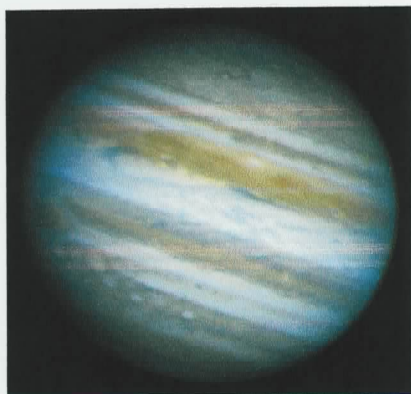
[http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-1997-09-a-full\\_jpg.jpg](http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-1997-09-a-full_jpg.jpg)



アルベドは高くないが、火星の大気は希薄であるため太陽の光は吸収されずにほぼそのまま反射される。火星に含まれる CO<sub>2</sub> による吸収線はこの波長域では確認できない。



# 木星



|         |                                   |
|---------|-----------------------------------|
| 観測日     | 11/12/1 50cm                      |
| 反射能     | 0.73                              |
| 有効温度(K) | 124.4±0.3                         |
| 大気圧     | 70kPa                             |
| 大気組成    | 水素<br>ヘリウム<br>メタン<br>水蒸気<br>アンモニア |

[http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-1998-04-d-full\\_jpg.jpg](http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-1998-04-d-full_jpg.jpg)

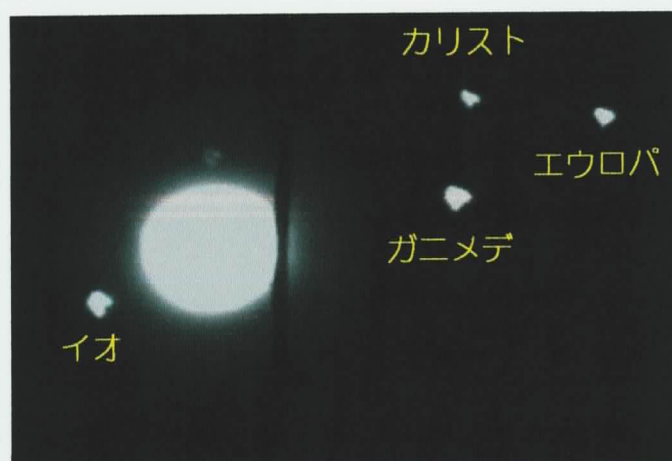
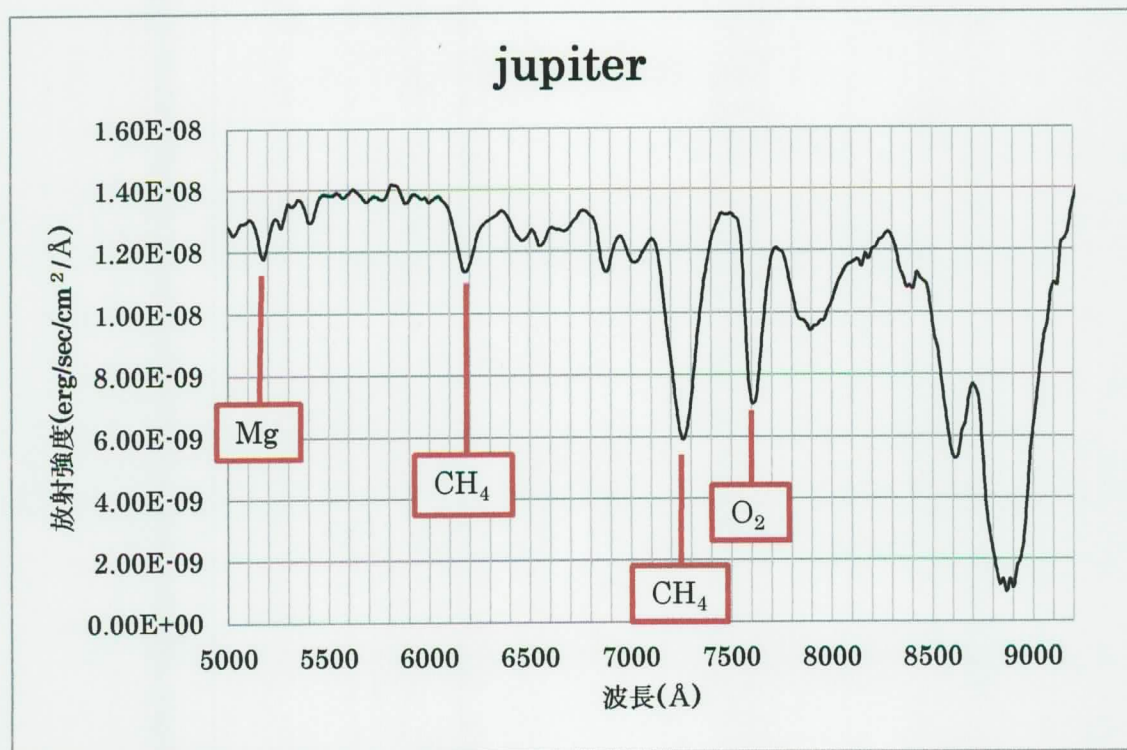


図 スリットビューワーに映った画像  
望遠鏡のピントが合っておらず、衛星の像がリング状になってしまっている。



図 木星のスペクトル画像

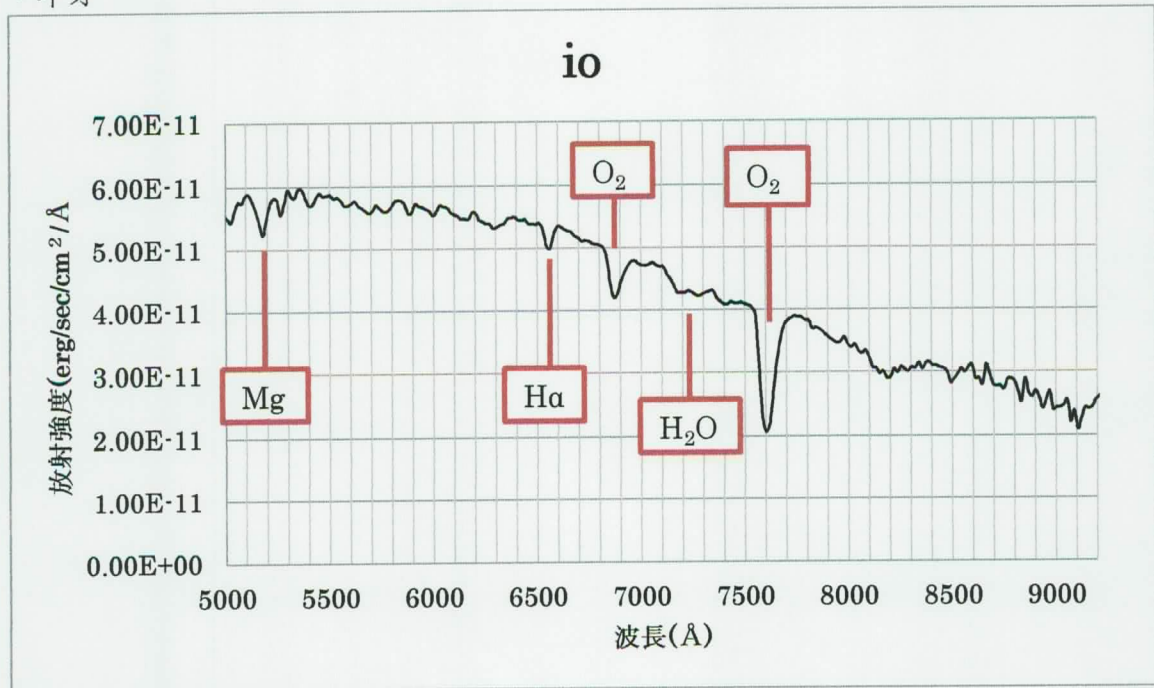




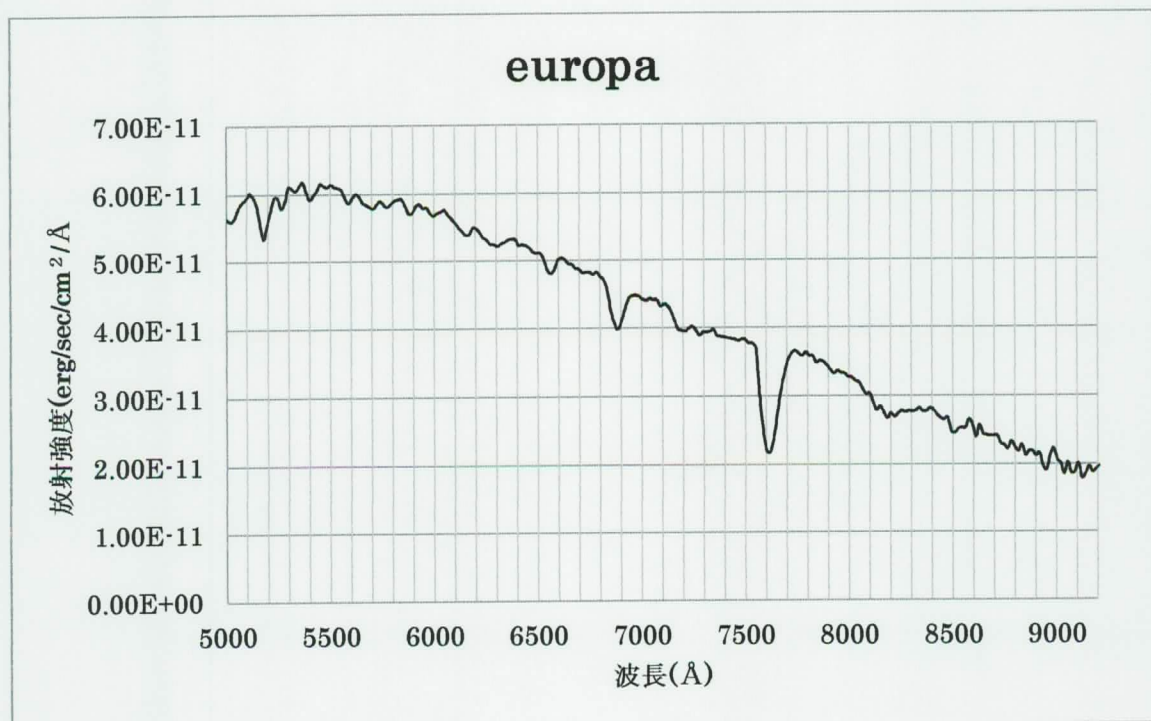
太陽スペクトルとほぼ同じであるが、木星大気に含まれるメタンによる吸収が見える。

ガリレオ衛星

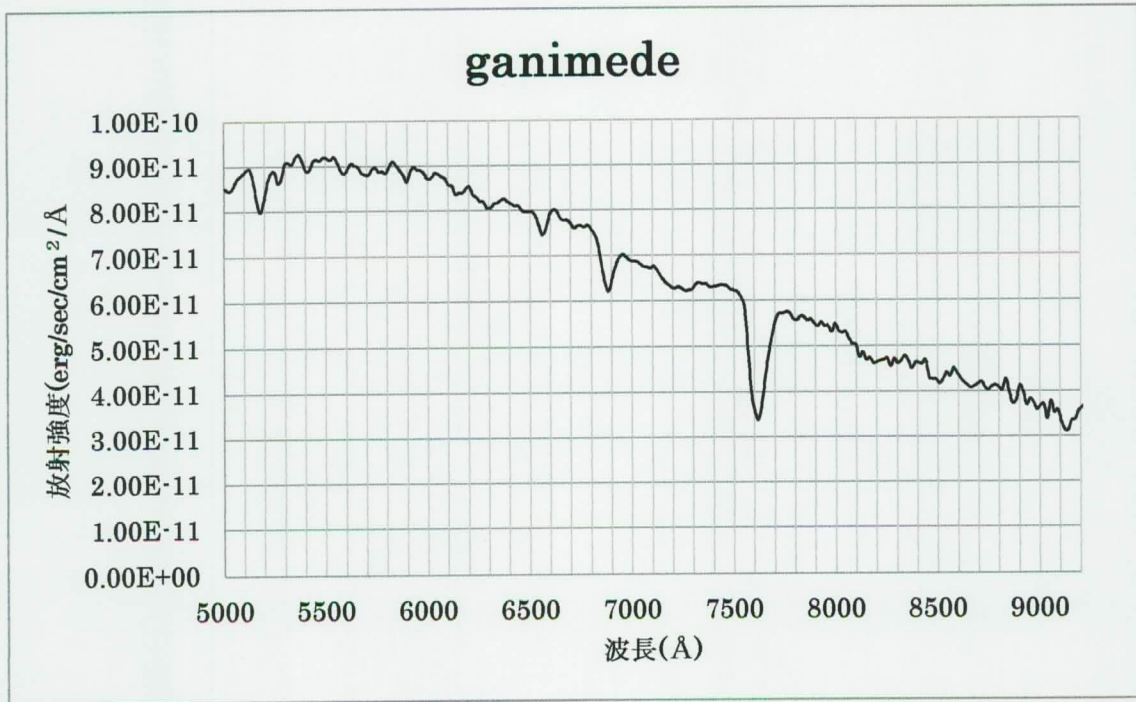
・イオ



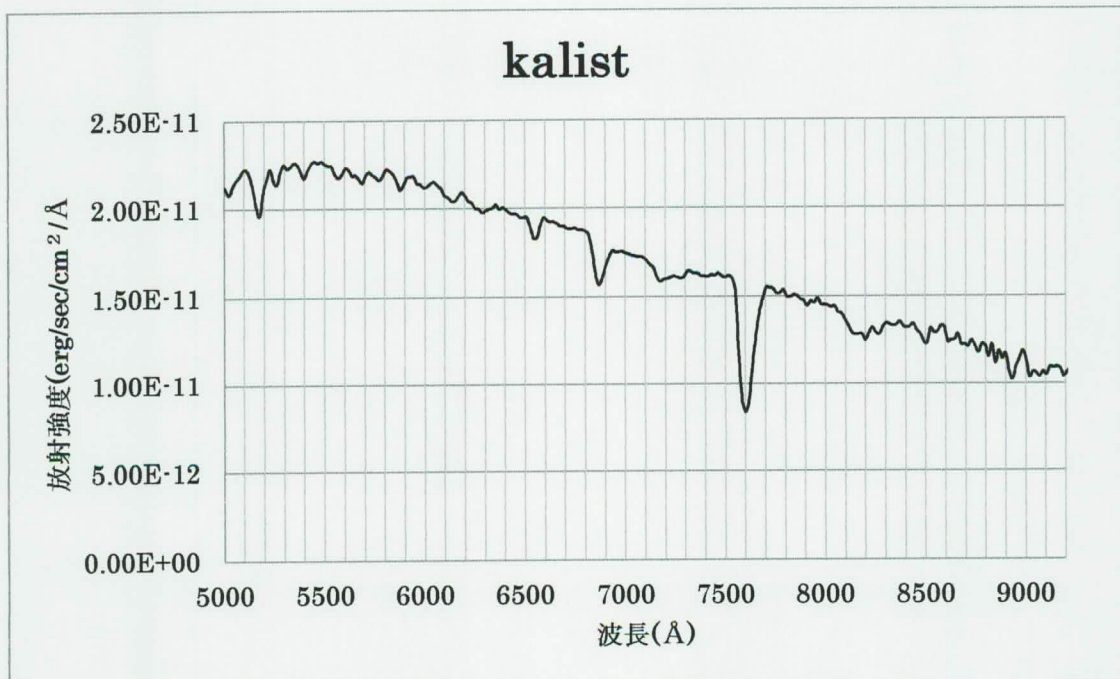
・エウロパ



・ガニメデ



・カリスト



これらのデータでは太陽のスペクトルとほぼ同じであった。



# 土星



|         |                                   |
|---------|-----------------------------------|
| 観測日     | 11/12/18 pirka                    |
| 反射能     | 0.77                              |
| 有効温度(K) | 75±15                             |
| 大気圧     | 140kPa                            |
| 大気組成    | 水素<br>ヘリウム<br>メタン<br>水蒸気<br>アンモニア |

[http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-1995-49-f-full\\_jpg.jpg](http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-1995-49-f-full_jpg.jpg)



図 スリットビューアーに映った画像

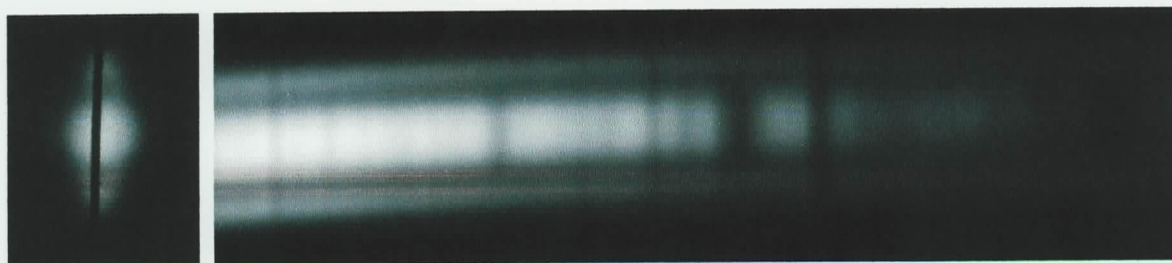
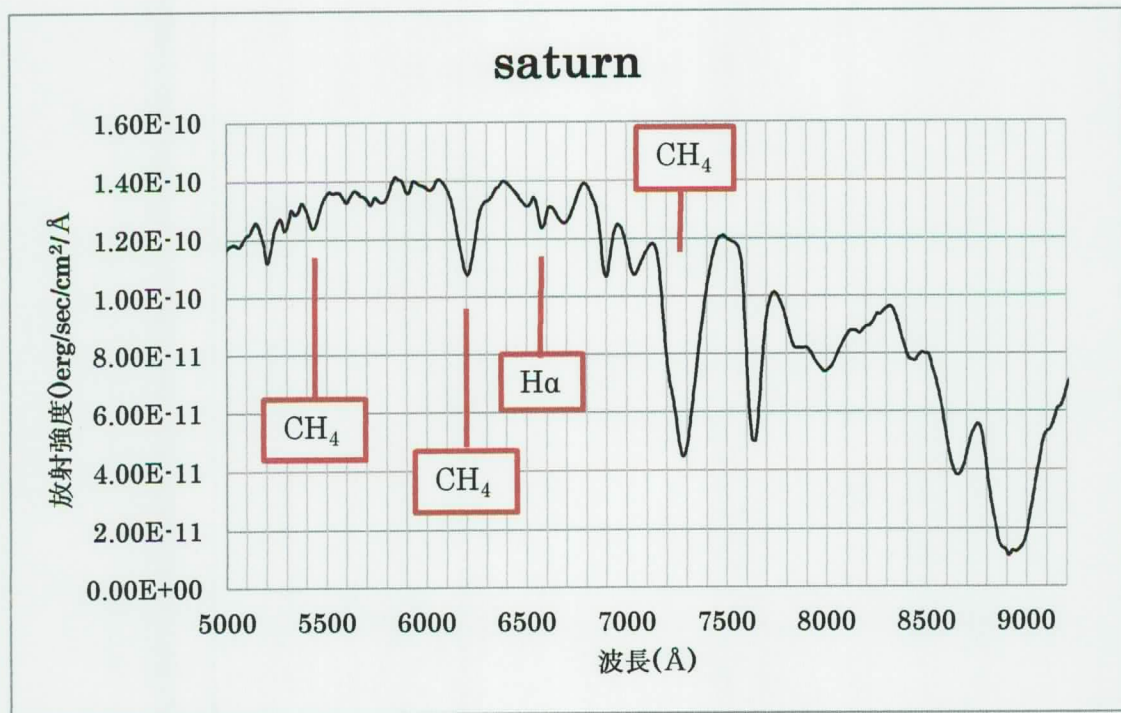
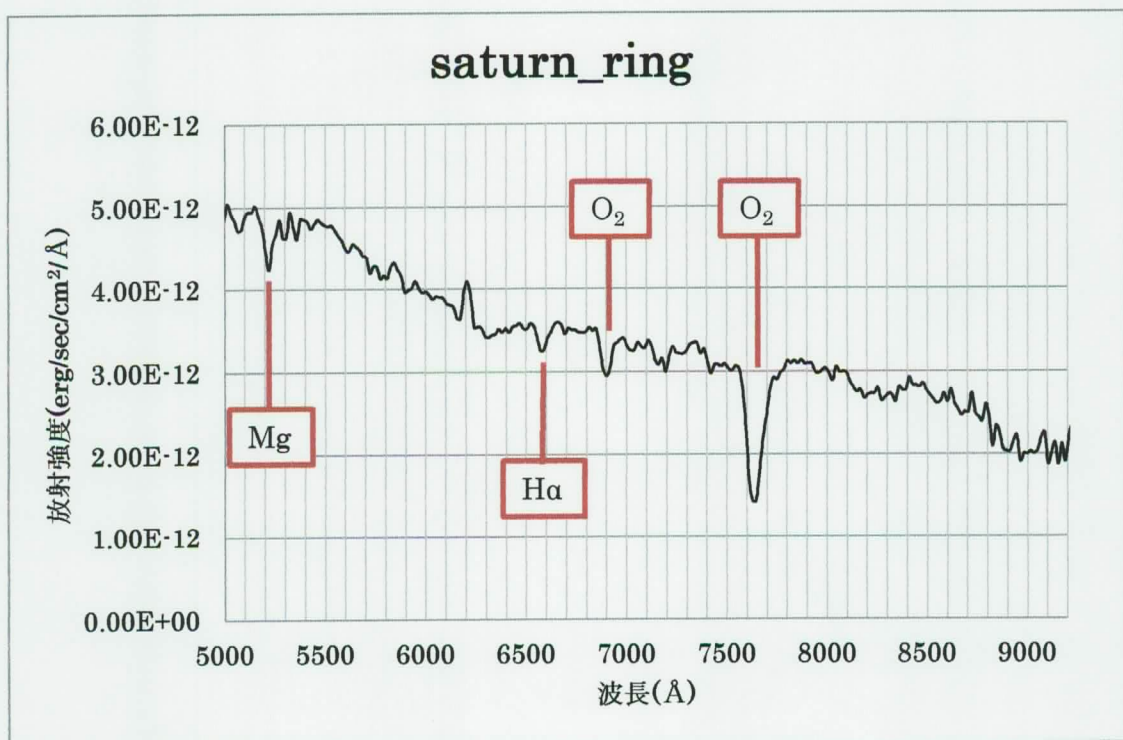


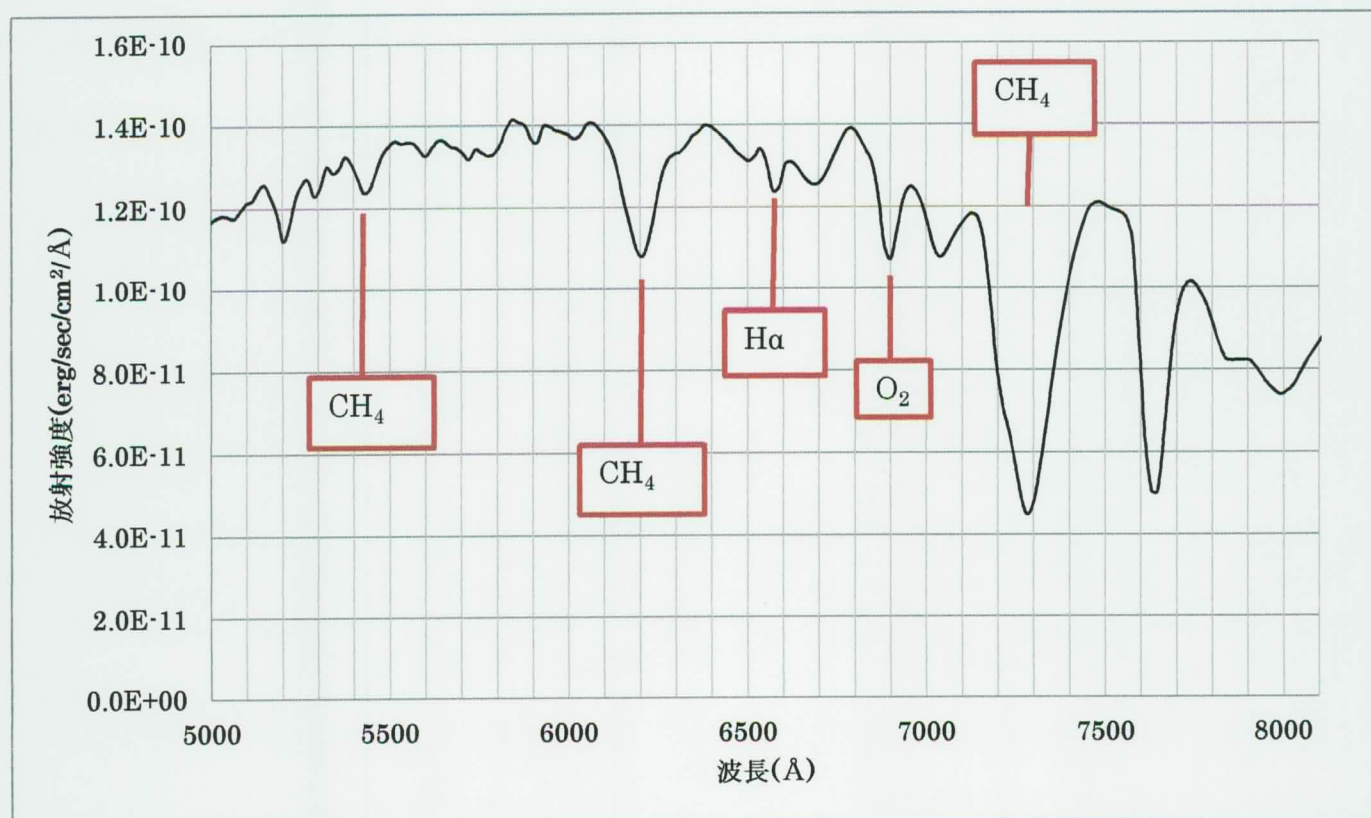
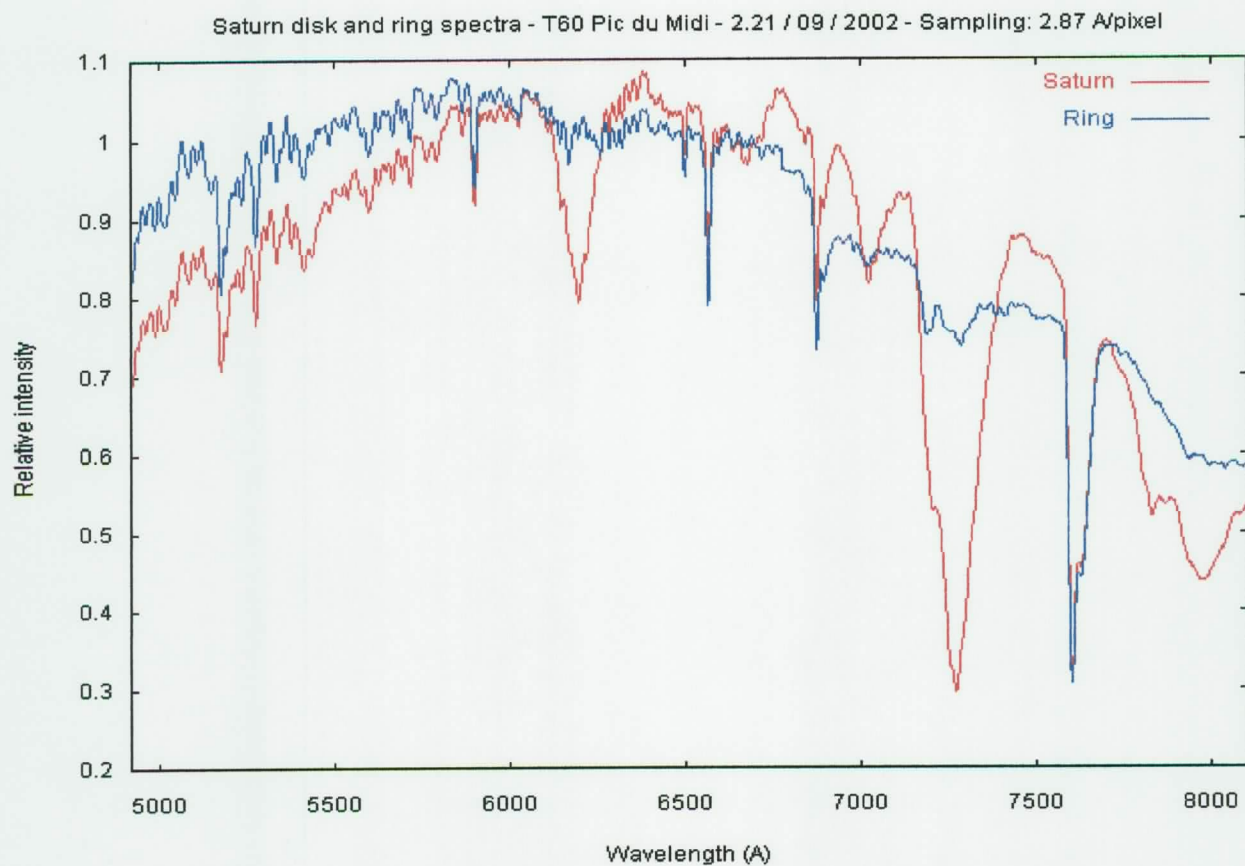
図 土星のスペクトル画像



土星大気に含まれるメタンやアンモニアの吸収が現れる。  
環は水の粒や岩石から成っており、太陽スペクトルとほぼ同じである。



# 先行研究との比較



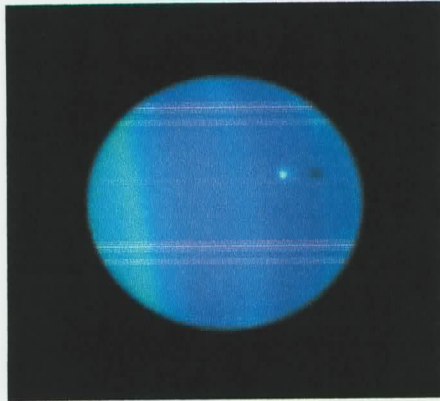
画像上のスペクトルはピレネー山脈にあるピク・ドゥ・ミディ天文台で 2002 年 9 月に撮られたものである。

[http://astrosurf.com/buil/us/mission2/psat\\_1.gif](http://astrosurf.com/buil/us/mission2/psat_1.gif)

本研究で撮影したスペクトルと比較してみると、波長分解能に違いはあるものの大体の形は同じになった。これより北教大分光器を用いた分光観測で正確なデータを得ることができたと考えた。

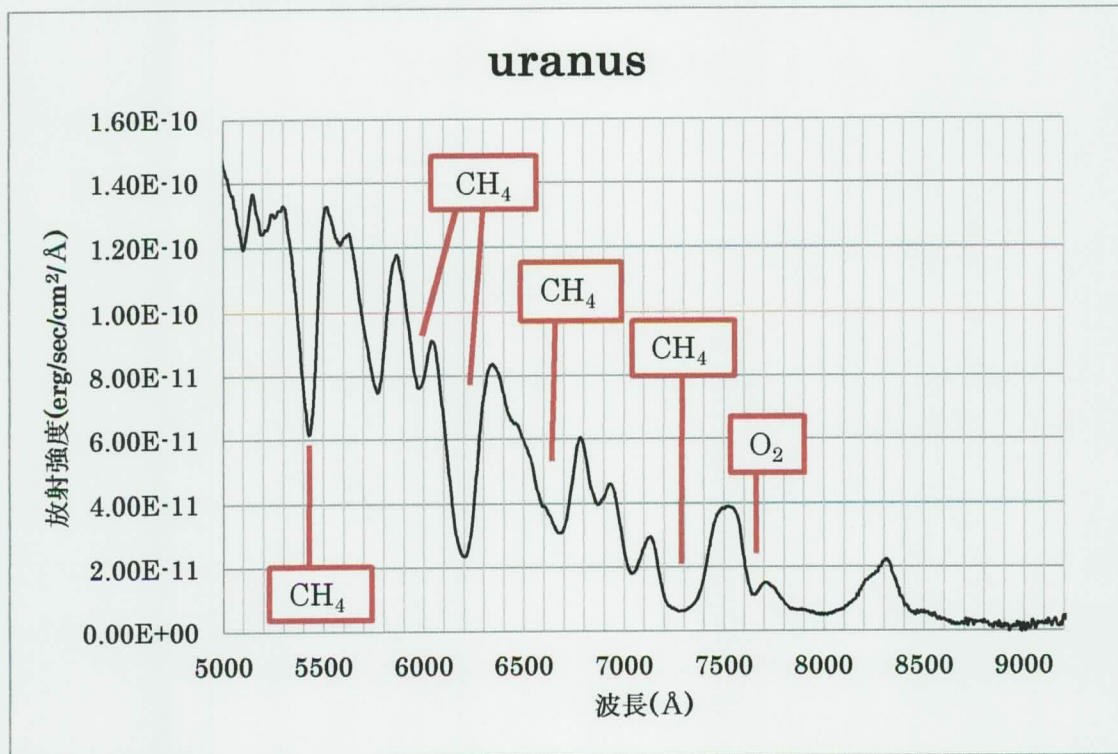
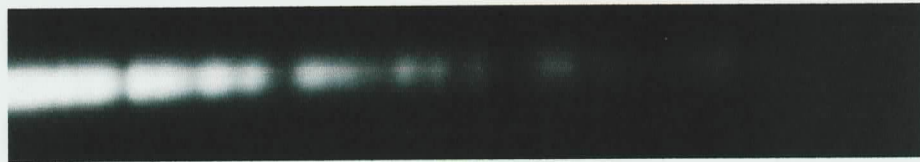


## 天王星



|         |                            |
|---------|----------------------------|
| 観測日     | 11/12/04 pirka             |
| 反射能     | 0.82                       |
| 有効温度(K) | $225 \pm 75$               |
| 大気圧     | 深さによって異なる                  |
| 大気組成    | 水素<br>ヘリウム<br>メタン<br>アンモニア |

<http://imgsrc.hubblesite.org/hu/db/images/hs-2006-42-b-full.jpg>



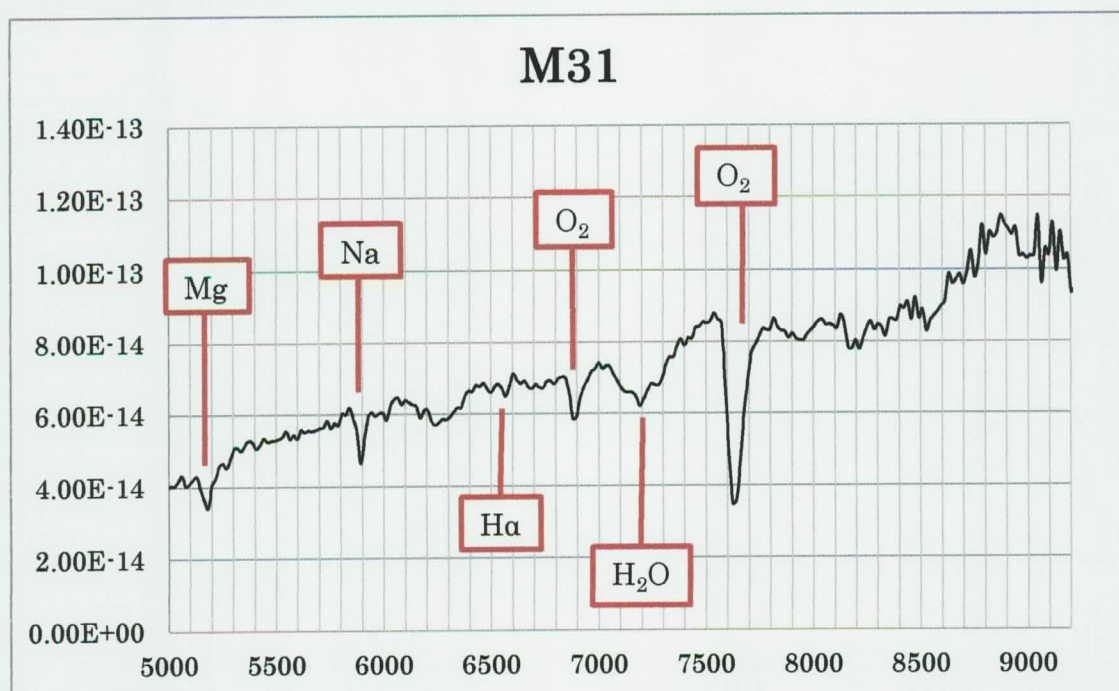
木星や土星よりメタンによる吸収が深くなっている。メタンによって長波長側の光が吸収されてしまうので天王星は青みがかって見える。

# アンドロメダ銀河(M31/NGC224)



|      |                |
|------|----------------|
| 観測日  | 12/01/08 pirka |
| 実視等級 | 4.4 等          |
| 距離   | 230 万光年        |
| 型    | 渦巻銀河           |
| 視直径  | 180'×63'       |

<http://spaceinfo.jaxa.jp/files/1921.gif>



銀河は恒星の集合であるので、銀河のスペクトルは恒星のスペクトルが重ね合わさったものである。

## 5. まとめ

### ・恒星のスペクトル

- O : He II の吸収(あるいは輝線)が 4600 Å 付近に見えるはずだが、この波長域では目立つ吸収線は見られない。大気吸収 (O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O) が見える。
- B : 徐々に H $\alpha$  線が見え始める。
- A : 大気吸収線のほかに、H $\alpha$  線が強く見られる。
- F : H $\alpha$  線が見え、Mg など金属の吸収線が見え始める。
- G : H $\alpha$  線が弱まり、Na の吸収線も確認できるようになる。ピークは 5500 Å 付近にずれてくる。
- K : K 型の表面温度を 4000K としてウィーンの変位則に当てはめると、ピークはおよそ 7250 Å 付近となる。Na や Mg などの金属の吸収が強く見え始める。H $\alpha$  線は見えなくなっている。
- M : M 型の表面温度をおよそ 3000K としてウィーンの変位則に当てはめると、ピークはおよそ 9700 Å 付近となる。このデータでもピークは長波長側にずれ右上がりのグラフになっている。
- TiO 分子吸収帯や中性金属線が現れている。Na の吸収が幅広くなっているのは TiO 分子吸収帯と重なっているためである

### ・惑星のスペクトル

- 水星: データ取得時が高度 10° 以下で薄明が起きている状態であったため、大気の影響も強く正確なデータが得られたと言えない。今回取得したデータではほぼ太陽と同じスペクトルを示している。
- 金星: データ取得時は高度 30° 以下であったため大気の影響を強く受けていると考えられるが、太陽とほぼ同じスペクトルを示し、放射強度のピークは 5000 Å より短波長側になった。
- 火星: アルベドは高くないが、火星の大気は希薄であるため太陽の光は吸収されずにほぼそのまま反射される。火星に含まれる CO<sub>2</sub> による吸収線はこの波長域では確認できない。
- 木星: 太陽のスペクトルとほぼ同じだが、木星大気に含まれるメタンによる吸収線が見られた。
- ガリレオ衛星: 今回取得したデータでは 4 つの衛星のスペクトルは太陽とほぼ同じであり、ピークも 5500 Å 付近に現れた。これらにほぼ違いが見られなかったことから今回取得したデータや解析が正確さに欠けていたのではないかと考えた。
- 土星: 太陽のスペクトルとほぼ同じだが、土星大気に含まれるメタンによる吸収線が見られた。



土星の環：土星の環は氷の粒や岩石からなっているので太陽の光をほぼそのまま反射し、スペクトルも太陽とほぼ同じになった。

天王星：天王星大気に含まれるメタンによって長波長側の光が木星や土星よりも深く吸収されてしまっている。そのため天王星は可視光では青みがかって見える。

太陽系の惑星は太陽の光を反射して我々の目に見えているので、基本的に太陽スペクトルと同じである。しかし、その惑星の大気組成によって吸収が出てくるものがある。そしてその大気組成によって吸収される波長に違いが出ると、可視光で見える惑星の色の違いにもつながる。

- ・ 星雲のスペクトル

NGC6543(キャッツアイ星雲)

M42(オリオン大星雲)

散光星雲や惑星状星雲では電離水素の輝線やOの禁制線が見られた。

- ・ 銀河のスペクトル

アンドロメダ銀河

銀河は恒星の集合なので、恒星のスペクトルが重なったものであった。



## 6. 展望

本研究では分光器の性能や観測方法、解析方法を理解するまでに時間がかかり、目標のうち撮ることができなかったものがあつた。また、データの精度としてあまりよくないものも含まれている。しかしピリカ望遠鏡、50cm 望遠鏡に北教大分光器を搭載して分光データを取得できることが示された。また、取得した恒星の O～M 型や惑星、輝線星雲などのスペクトルカタログの作成を行い、一部は既知のデータと比較することができた。今後は観測および解析の精度があがること、今回取得に至らなかった新たなデータの取得、そして北教大分光器がさらに活用されることを期待する。

## 7. 謝辞

本研究にあたり関口先生には熱心にご指導いただき、観測から結果の考察に至るまで面倒を見ていただいた。さまざまな部分で助言やご指導をいただき、この論文を書き上げることができ、とても感謝している。

京都産業大学の河北秀世教授には分光観測の手順から解析のご指導、その他にも問題があったときには相談に乗っていただくなど大変お世話になった。分光観測に関してなにもかも初耳な状態でいろいろお聞きしていたが、一からとても丁寧に教えていただきこの卒論を書けるまでに至ることができた。河北先生には何度も時間をとっていただき、ご指導していただいたことでここまで理解することができるようになったと感じている。

北海道大学院理学院の渡辺誠特任助教授にはピリカ望遠鏡の使用にあたり、分光器の取り付けなどでお世話になった。分光器の搭載にはさまざまな問題が生じたが、適切な助言をいただき、搭載の上データ取得までに至ることができた。

なよろ市立天文台職員の方々には、天文台使用にあたって大変親切にしてくださいいただき素晴らしい環境で観測を行うことができた。本研究に関するだけでなく、さまざまな情報を教えていただいたことで、改めて天文学の面白さや奥深さにひかれるようになった。本研究はなよろ市立天文台のみなさんのあたたかいご支援があり、成りたったものと大変感謝している。

本研究でたくさんの方のお世話になり、みなさんのご協力のおかげで下記あげることができたと感じている。お力添えをいただいたことに大変感謝している。

## 8. 参考文献

- ・ シリーズ 現代の天文学 第15巻  
宇宙の観測 I - 光・赤外天文学  
家 正則・岩室史英・舞原俊憲・水本好彦・吉田道利 編
- ・ 理科年表 国立天文台編 平成 24 年
- ・ ALLEN's ASTROPHYSICAL QUANTITIES FOURTH EDITION  
ARTHUR N. COX, Editor
- ・ ASTRONOMICAL PHOTOMETRY  
Arne A. Henden  
Ronald H. Kaitchuck
- ・ 天文資料集  
大脇直明・磯部瑛三・斎藤馨児・堀源一郎 著
- ・ AN ATLAS OF DIGITAL SPECTRA OF COOL STARS  
Diane E. Turnshek・Patricia C. Boeshaar
- ・ 星間物理学 宇宙物理学講座第3巻  
小倉智一 著
- ・ 原子スペクトルと原子構造  
堀 健夫 訳
- ・ 美星天文台 101cm 望遠鏡 IRAF による分光データ整約のすすめ  
<http://www.bao.go.jp/koubo/manual/irafspbao0505.pdf>