



スペクトルが撮れたら 恒星と流星の解析の違い

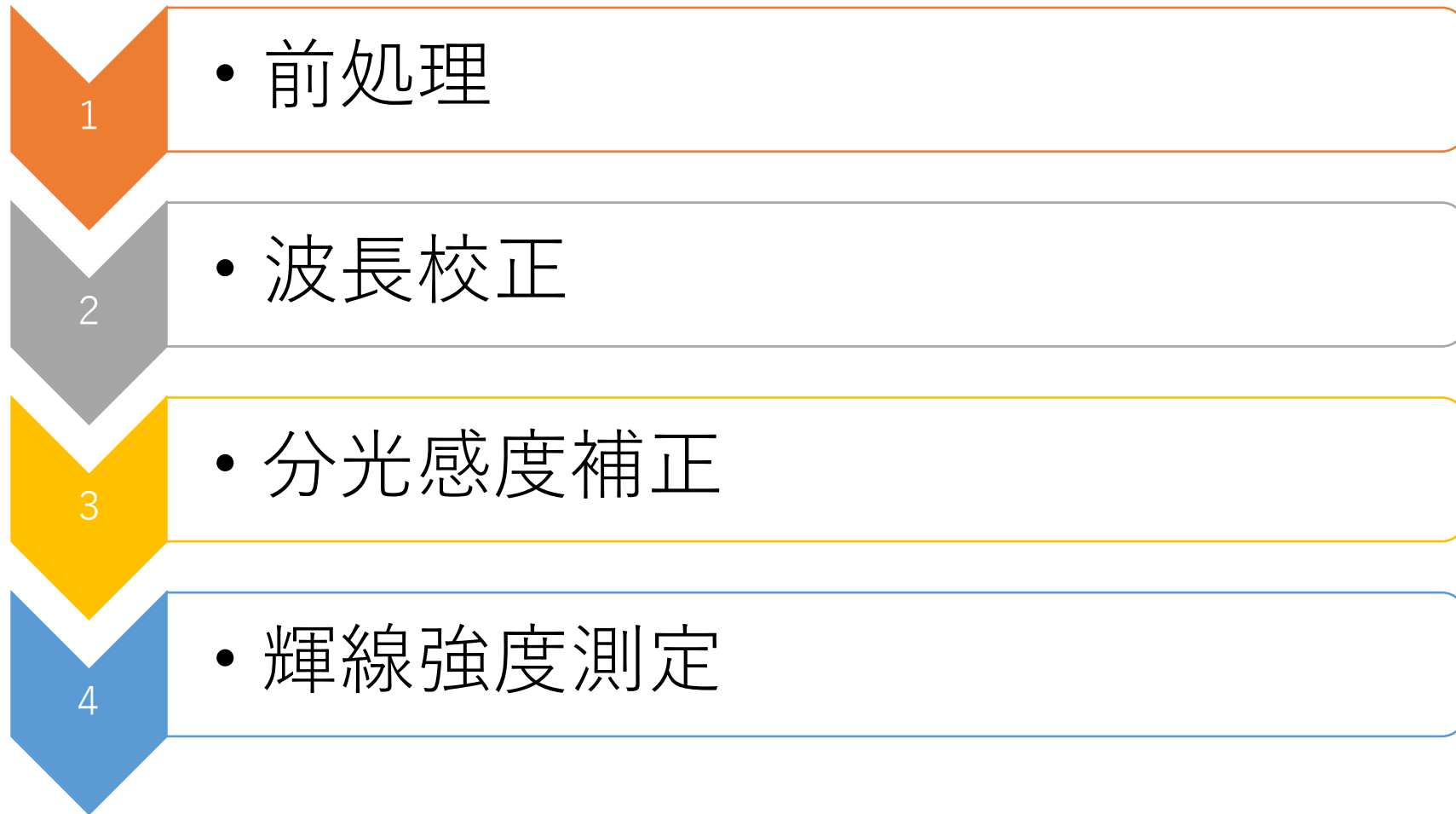
1. (本来は有りませんが) 解析の違い
2. ガウス関数を用いた輝線面積測定
3. 低分散でも「鉄」を測りたい!

流星スペクトル研究集会 2019年3月8日(金)

国立極地研究所(東京都立川) C棟3階C302

VSOLJ (変光星観測者連盟) 永井和男

主なやる事



前処理

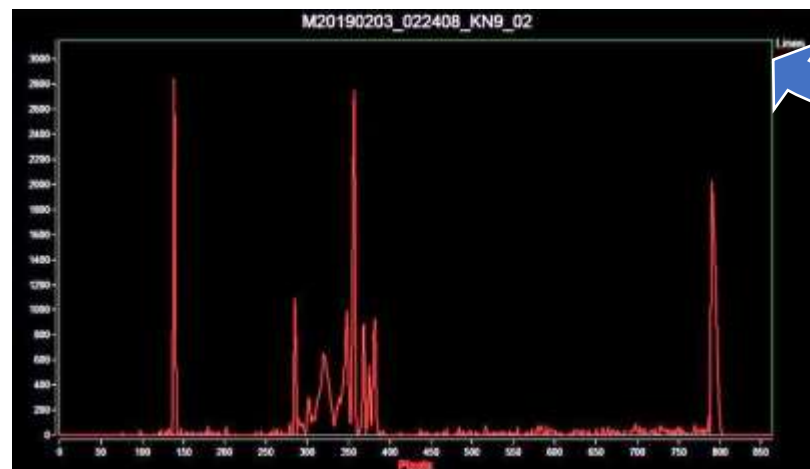
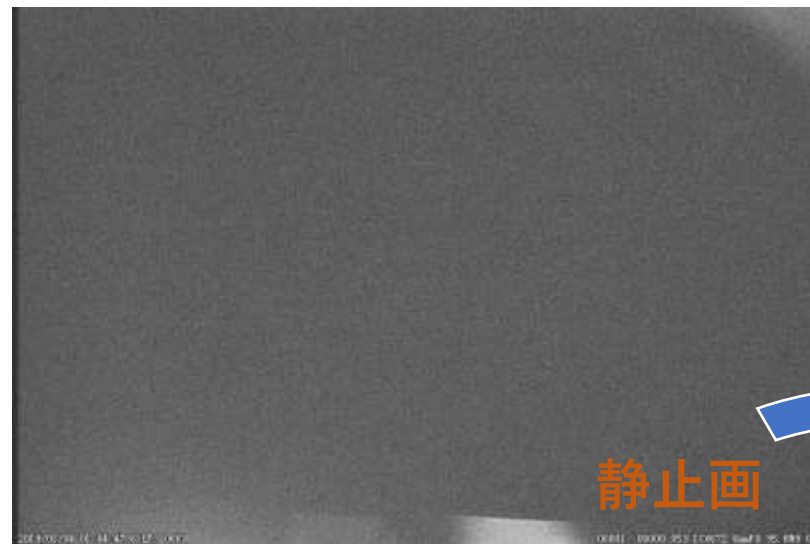
AVI (動画)



JPEG (静止画)

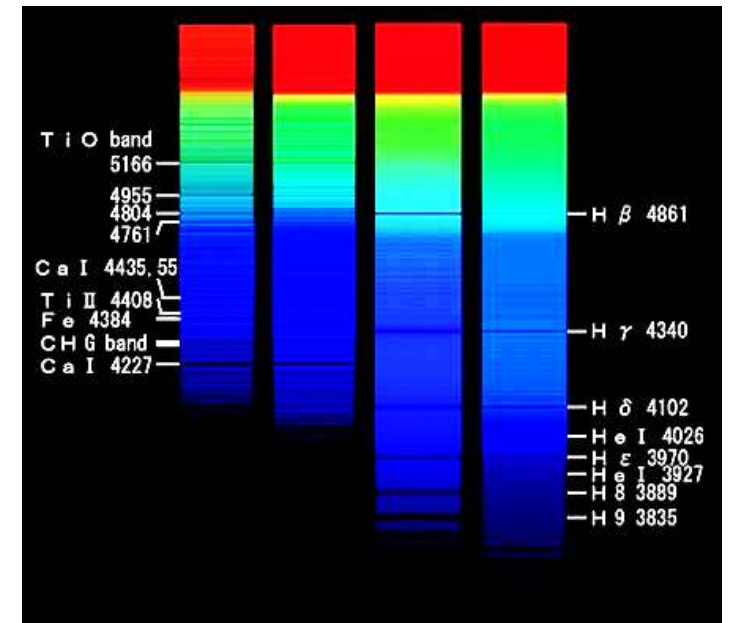


ビンニング・トリミングなど



波長校正

- 分光器の種類
 - スリット式
 - 対物式
- 波長校正するにはどちらも基準が必要
 - スリット式
 - 基準光（鉄ネオンランプ、水銀灯…）
 - 対物式
 - 恒星の人→恒星スペクトルの取得
 - 流星の人→特徴的輝線の利用
 - 恒星の人は、
 - どれがMgかわからない / 分かっても確信が持てない
 - 要するに経験不足



ここで工作

分光器を作ろう



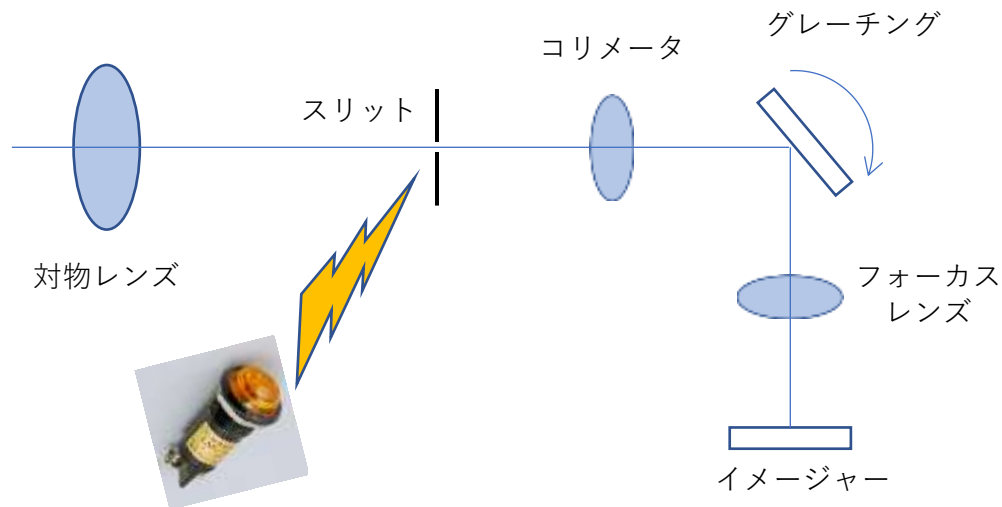
グレーチング

セロテープ
2箇所とかで固定

スマートフォン

- スマホカメラ前にグレーチングを貼って様々な灯りを見てみよう
- オレンジ色のLEDは赤と青のLEDが点灯している事がわかる
- 鉄ネオンランプはたくさんの輝線が見える
- 室内照明がブロードだとLEDで輝線だと蛍光灯とわかる

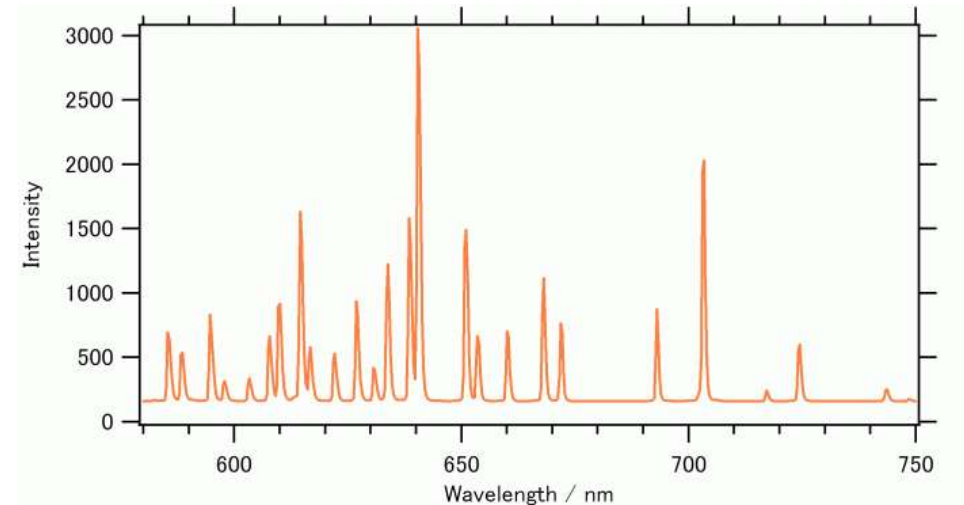
波長校正：スリット式分光器



基準光でスリットを照らす

スリット式分光器はスリットに焦点が合っています。スリットを撮影しているのです。スリットを基準光で照らすと、基準光が分光されて写ります。

ネオンランプの輝線



美星天文台 101cm 望遠鏡 分光器
鉄・ネオン 波長チャート

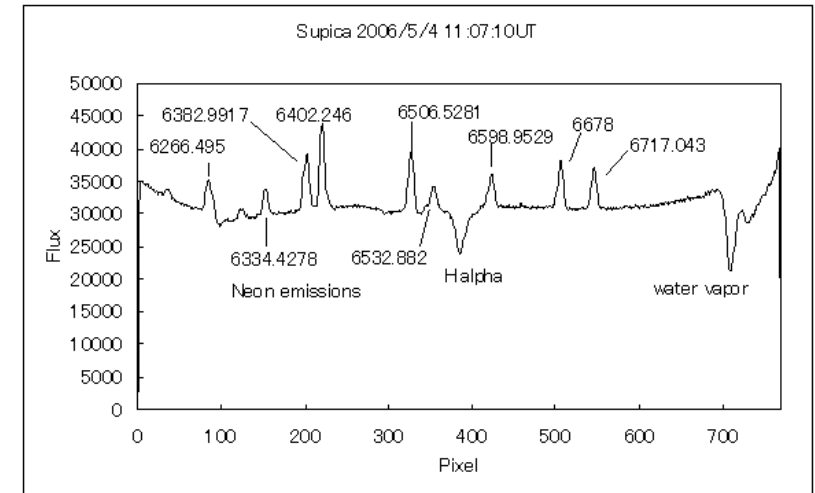
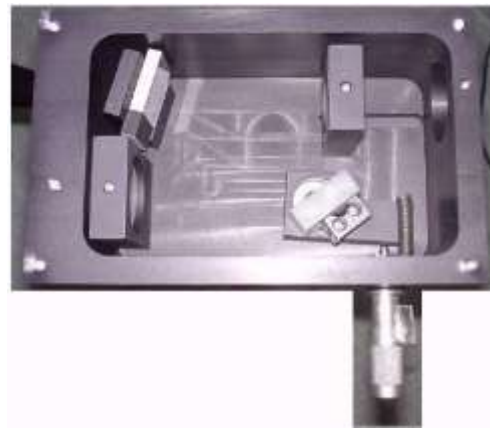
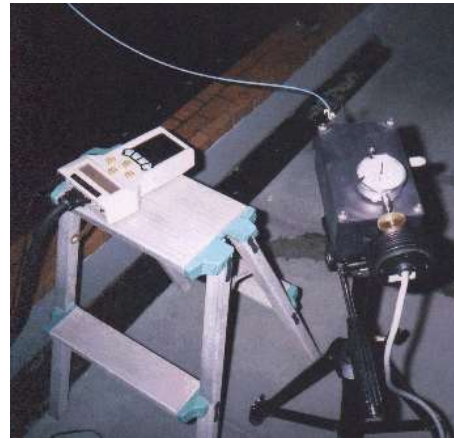
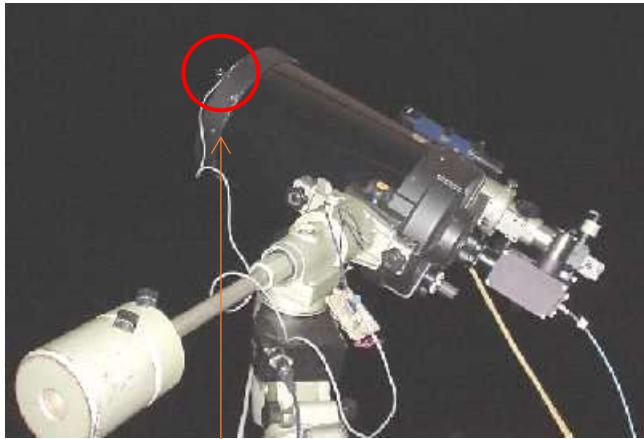
美星も鉄ネオンを使っています

第1.0版

川端哲也 (美星天文台)

2005年4月

波長校正：スリット式分光器（実際の例）



ネオンランプ
で明視野照明
します

UU Psc, H alpha, 1/Nov/2008

exposure start 10:09:02UT center 10:19:20UT



exposure start 10:29:15UT center 10:39:15UT

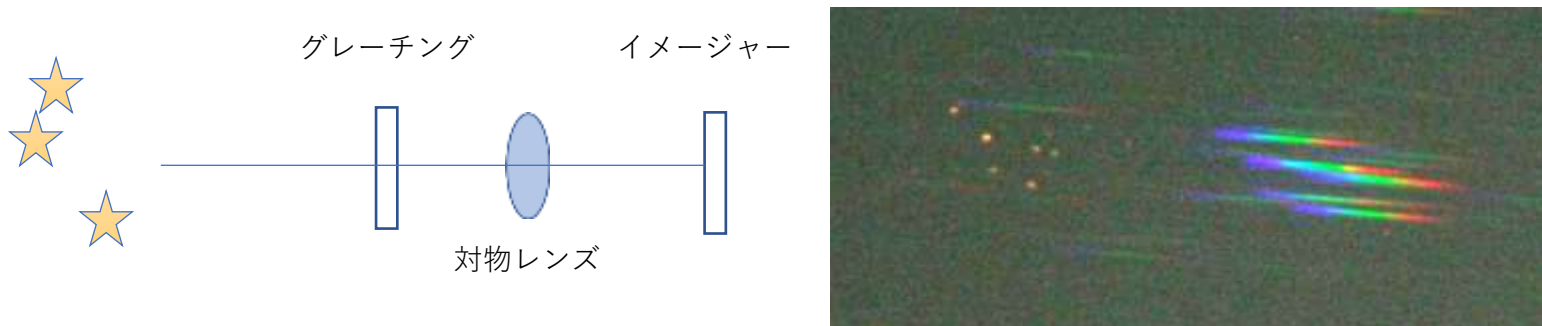


neon lamp



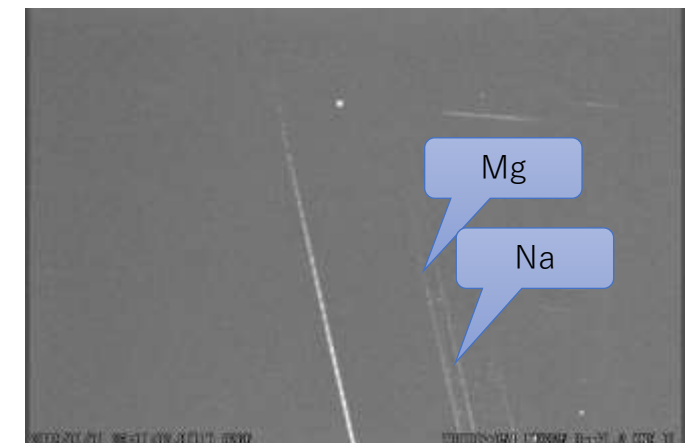
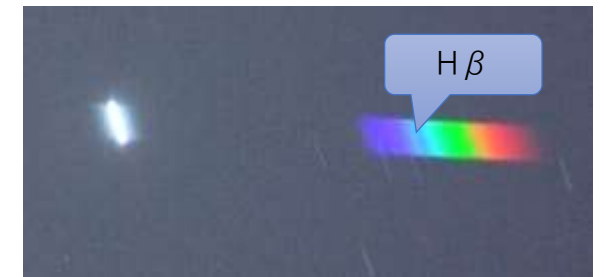
6266.495 6334.4278 6382.9917 6402.246 6506.5281 6532.882 6598.9529 6678 6717.043

波長校正：対物式分光器



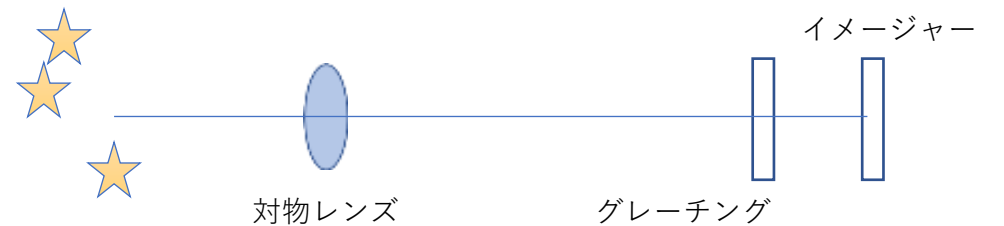
左は「すばる」です。このように対物式は一度に複数のスペクトルが取得できます。また、広い範囲を撮影出来ます

- グレーチングをネオンランプのような基準光で照らしても基準光のスペクトルは得られません
- 基準光を無限縁まで離せばスペクトルが取得できます
- 恒星分光では、恒星を撮影して水素のバルマー線などを基準にしています
- 流星分光では、初めは水素のバルマー線などを基準にして分散量を求めて
- 次は、Mg Na のような特徴的ラインを用います
- 分散量だけで波長校正すると誤差が大きくなります
- 何かの基準を使って、その都度、その画像の分散量を求めて解析します



分散量

1. スリット式 → 画像のどこでも同じ分散量
2. 対物式 → 入射角で変わる（光路長が変わる）



恒星分光：接眼部側の例

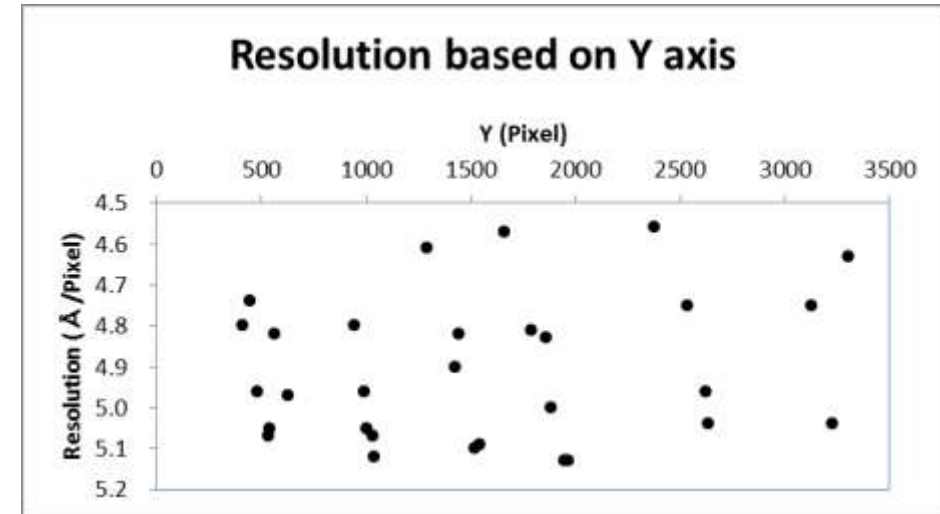
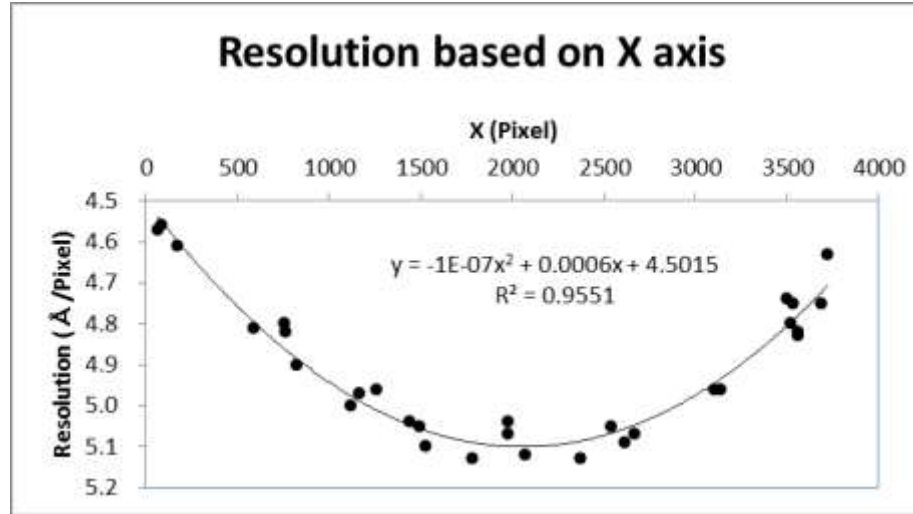
焦点距離の長い光学系でイメージャーの手前にグレーチングを配置して撮影する例
画像のどこもほぼ同じ分散量

f=600mm(F4) SA-100 ATIK-490EXで撮影した V888 Mon
chip size 12,5x10mm

分散量：単焦点レンズの場合

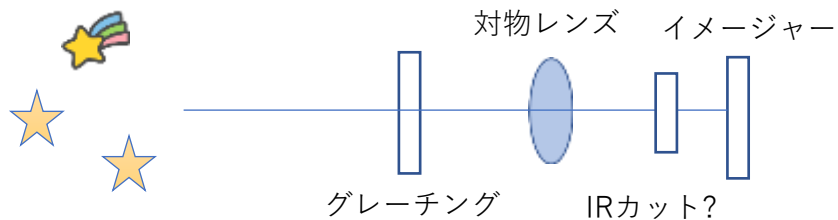


CANON EOS Kiss X4
f=28mm 300本/mm



- 短い焦点距離の光学系で対物式分光器を作ると0次の位置によって分散量がかわってしまう
- イメジャーのX軸と分散方向を合わせて恒星を撮影し分散量を求めた
- 横軸をX軸座標・縦軸を分散量とすると二次関数にフィットできた
- Y軸に対しては相関が無かった
- このようにしてスペクトルが撮影できたら、0次の位置で分散量がもとめられます
- その分散量を用いて解析しMgのような特徴的輝線が同定できたら、その輝線波長で再校正すると精度が上がります

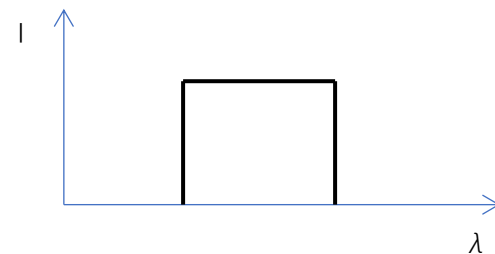
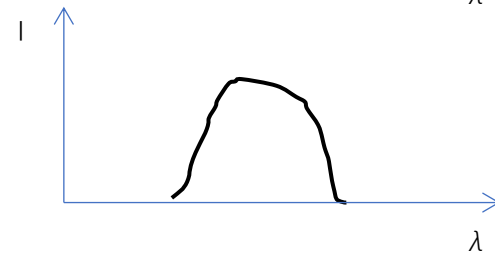
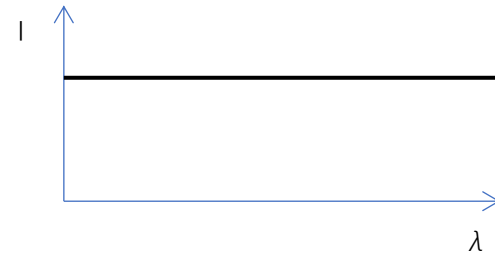
分光感度補正



撮影システムは固有の分光感度を持っています

波長によって、写ったり・写らなかったり
明るく写ったり・暗く写ったりします

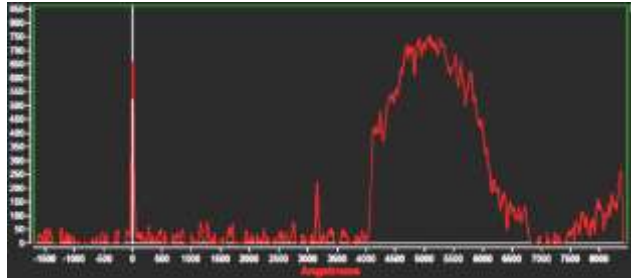
このように写ったものを感度補正してその波長の輝線が本来の強度になるように補正をします



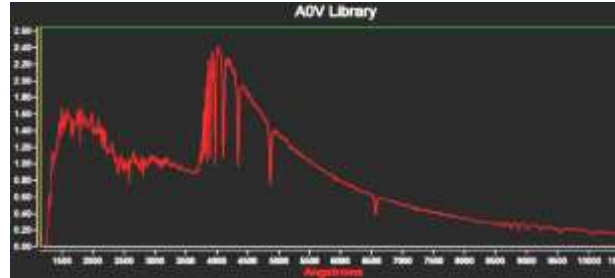
- 0から ∞ までの放射を持った電磁波を撮影しても
- 特定の波長しか撮影できない
- 撮影帯域の分光感度を補正しないと強度を評価する事ができない
- 感度補正をします

分光感度補正の原理

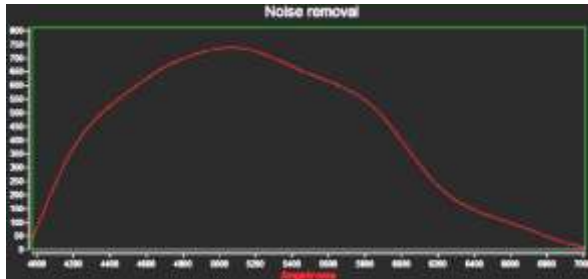
シリウスを撮影



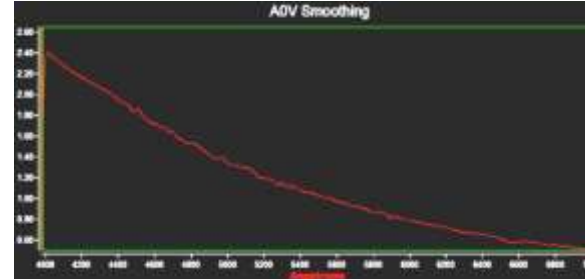
シリウスの
ライブラリデータ



ノイズを除去して
コンティニウムな
ラインを作成

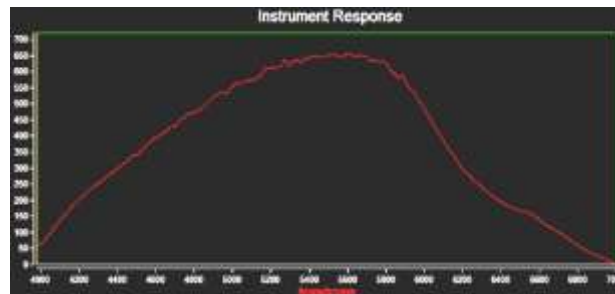


ノイズや吸収線を
除去して
コンティニウムな
ラインを作成



割り算

撮影したスペクトル (RAW)
をライブラリスペクトル
(Library)で割り算すると
機械レスポンス (Inst.)が
得られます



$$\text{Instrument Response} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Library Spectrum}}$$

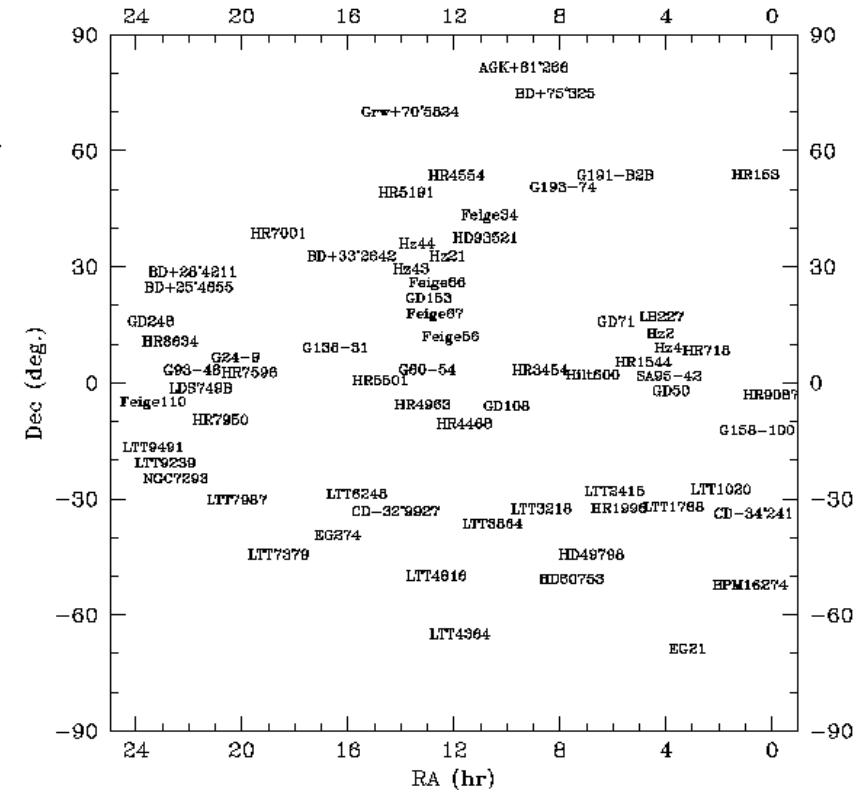
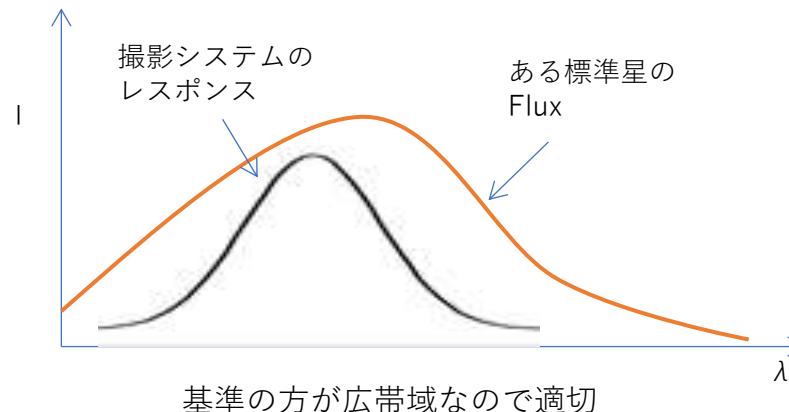
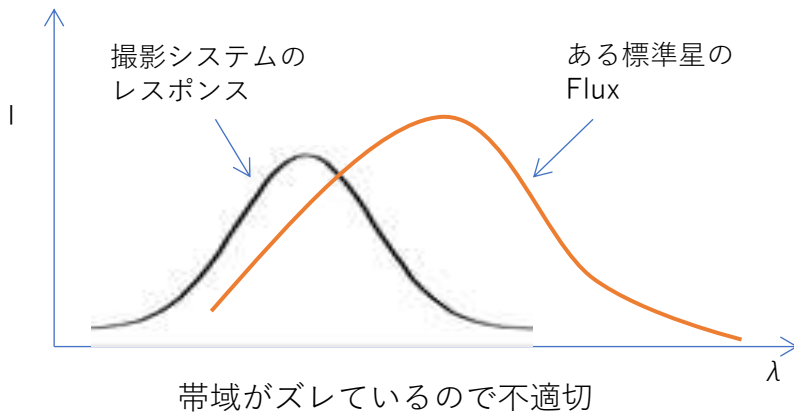
$$\text{Calibrated Profile} = \frac{\text{Raw Spectrum}}{\text{Instrument Response}}$$

流星のスペクトル (RAW) が撮影出来たら機械レスポンス (Inst.) で
割ると分光感度補正された流星スペクトルが得られます

分光感度補正にも基準光が必要

補正用の基準光

- 通常は恒星（分光標準星）を使う
 - ライブラリデータ：分光感度補正されたスペクトルデータ
- 恒星の場合、同じスペクトル型の恒星がよい
 - 彗星はG型星とか...
- 基準にする恒星からのエミッションが撮影システムの帯域をカバーしていないといけない

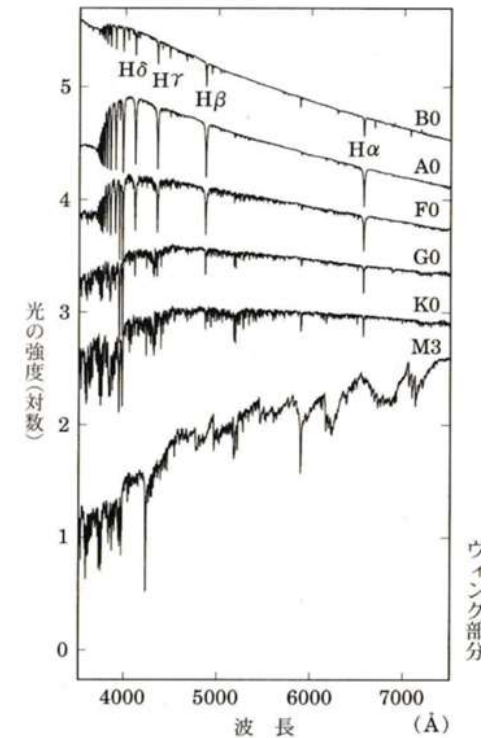
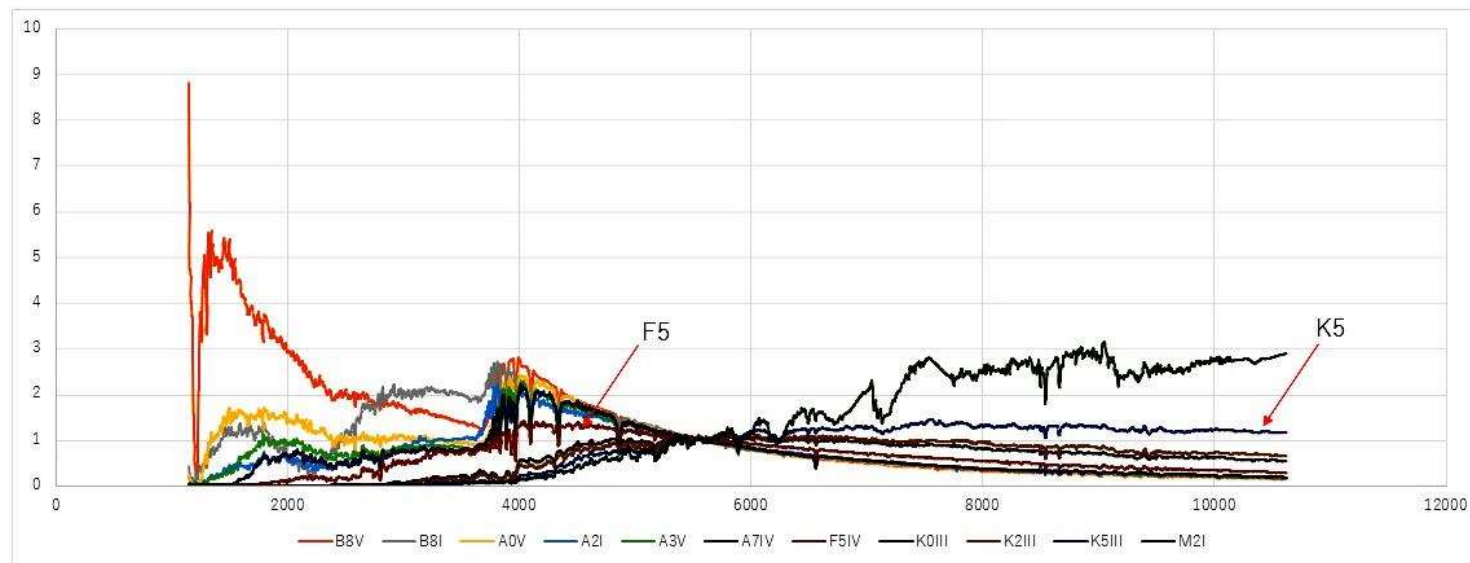


Sky map of spectrophotometric standards

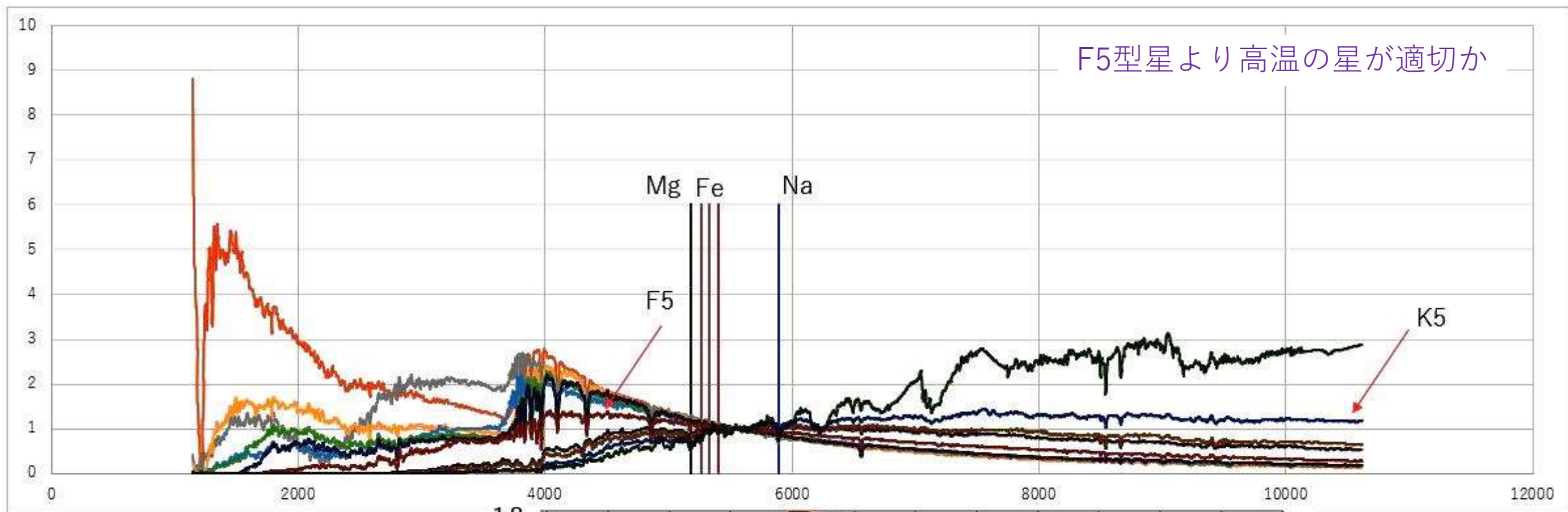
流星の分光感度補正

- では、流星は
- エミッションの帯域が広い
- どんな流星も観測したい、けど
- イメージャーの帯域以上は観測できない
- 基準星はイメージャーの帯域より広い範囲のエミッションがある物を選ぶ、エミッションのレベルも高いほうがよい
- また、一等星のような明るい恒星を選ばないとS/Nが良くない

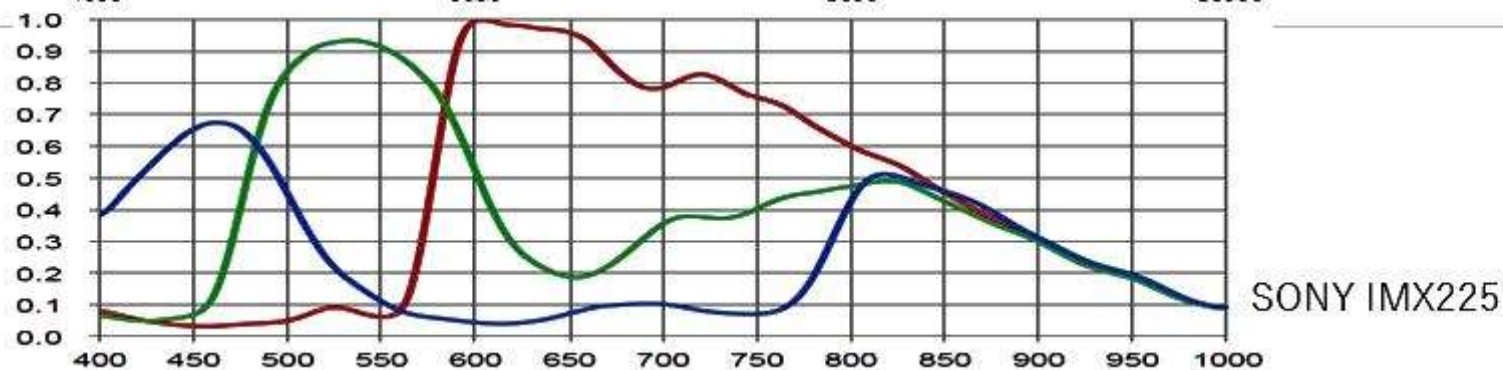
name	type
α Vir	B1V
α Leo	B7V
β Ori	B8Ia
α Lyr	A0V
α CMa	A0m
α Cyg	A2Ia
α PsA	A3V
α Aql	A7IV-V
α CMi	F5IV-V
β Gem	K0III
α Boo	K2IIIp
α Tau	K5III
α Aur	M1
α Sco	M1Ib
α Ori	M2Ib



一等星とイメージャーのレスポンス

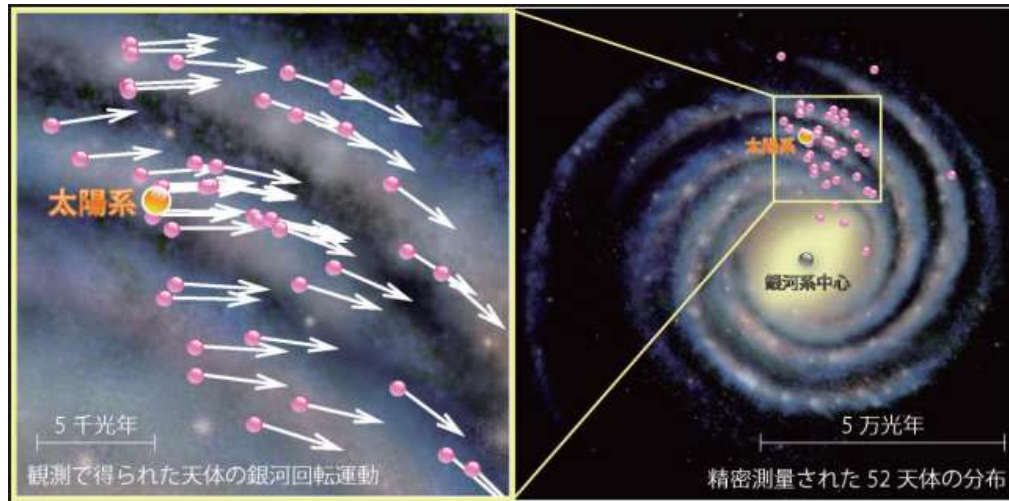


Mg 518.2
Fe 527.0 532.8 540.5
Na 589.2



波長校正 まとめ知識

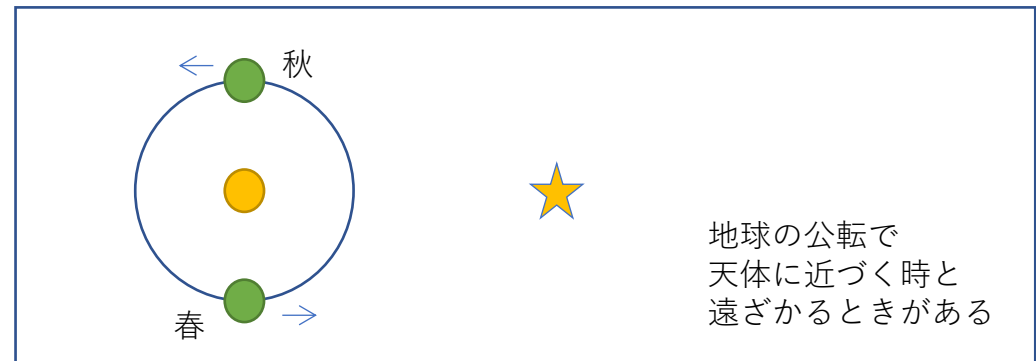
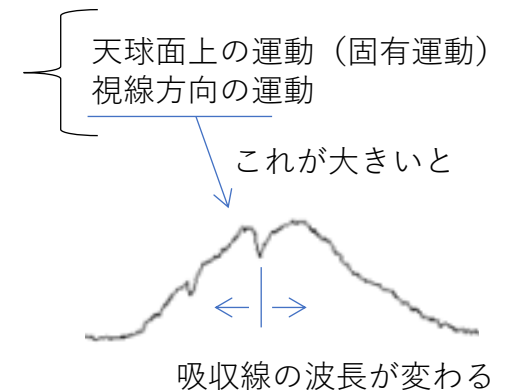
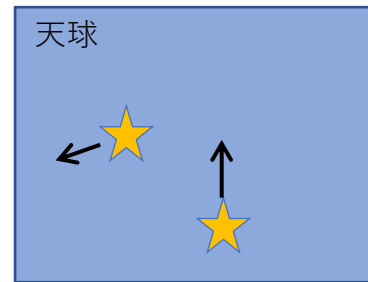
- 高分散分光では恒星の固有運動や地球の公転の補正が必要



視線方向の運動で吸収線の波長が変わります
運動速度は天体の距離と無関係で
100km/secで運動しているものも少なくありません

地球の公転でも吸収線の波長が変わります

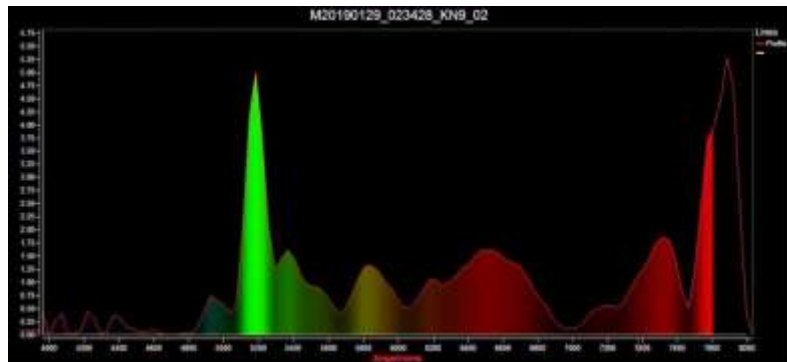
銀河系の天体はどれも同じ速さで公転しています。
が、実際には固有運動があって様々でもあります。
(固有運動は2成分)



さて、これで終わり？

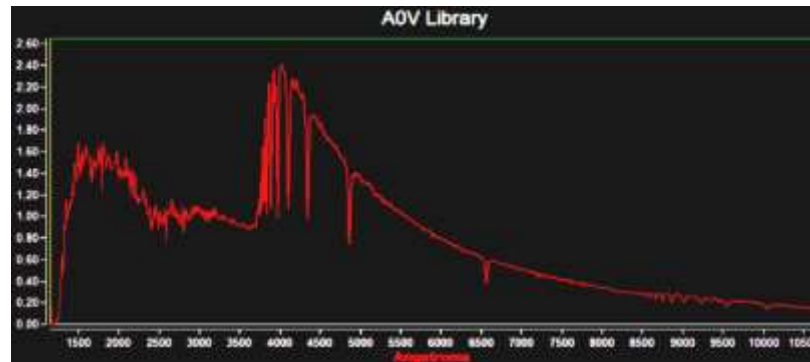
- 波長校正/感度補正が終わったので輝線強度を測りましょうか

流星



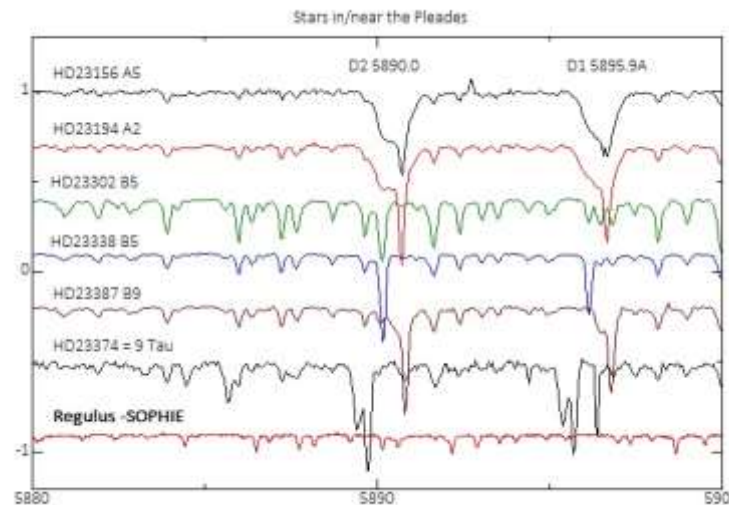
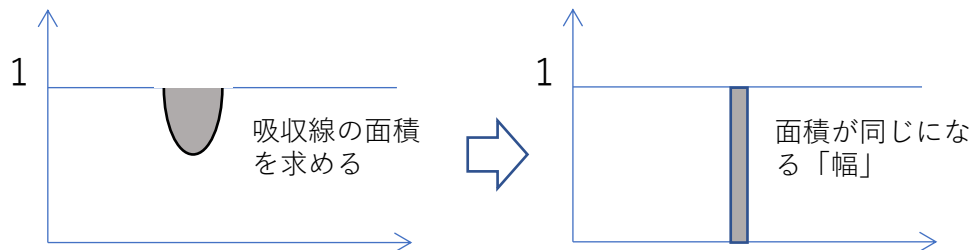
波長も感度も補正され、このようになりました

恒星



同じ処理をしたA型星
恒星の人は、この状態では輝線・吸収線の強度をはかりません

恒星分光は規格化（右図）して等価幅を測定し比較します。
こっちの方がよく見えますよね



流星もこの処理をするなら

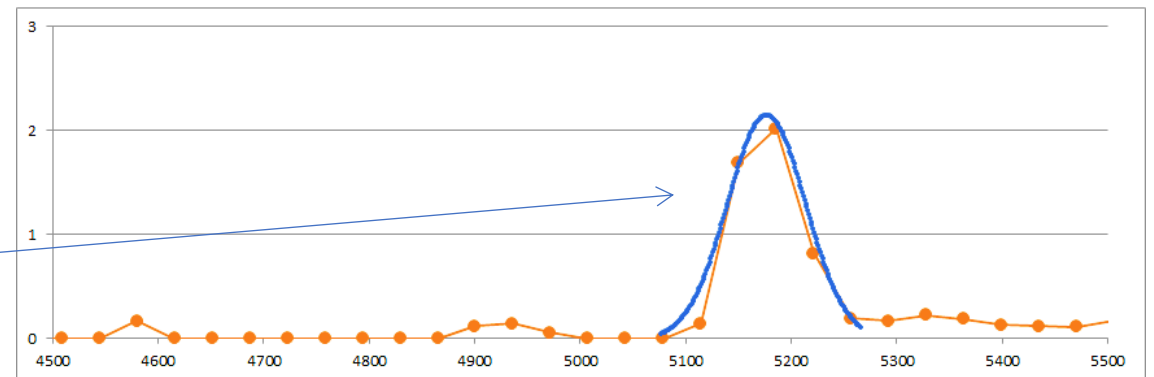
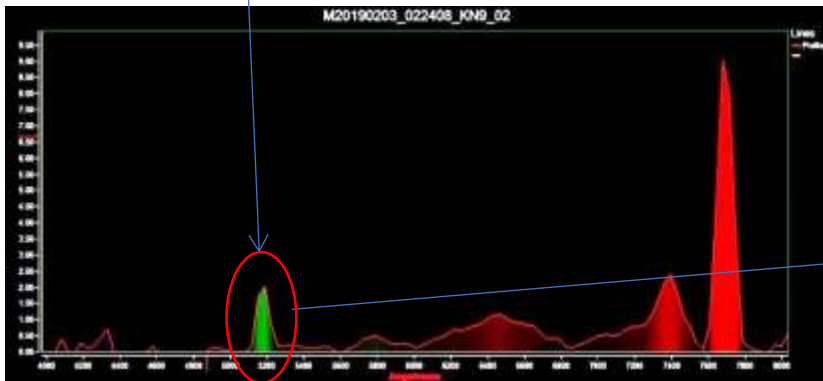
どの温度のBlack Bodyを使えば良いか

知る必要がある

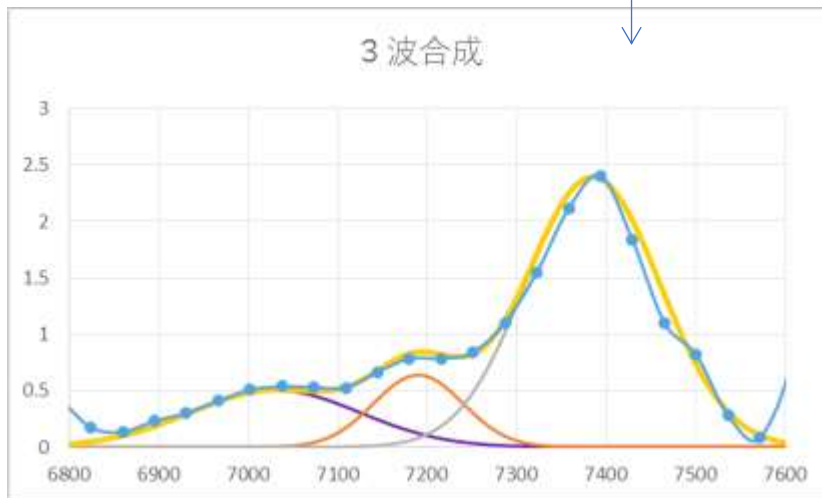
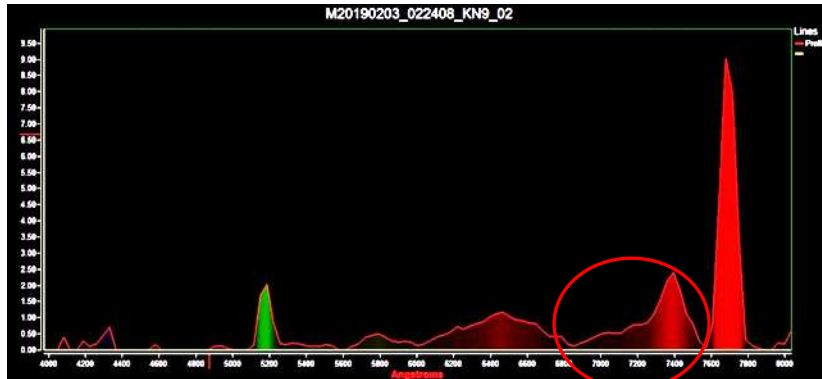
ガウス関数を用いた輝線面積測定



- 流星の輝線強度は輝線の面積を測る
- 手法は？ガウス関数にフィットさせるらしい
- 左の流星スペクトルを波長校正・分光感度補正を行って輝線をガウス関数にフィットさせて見ました
- 赤がスペクトル線、青はガウス関数

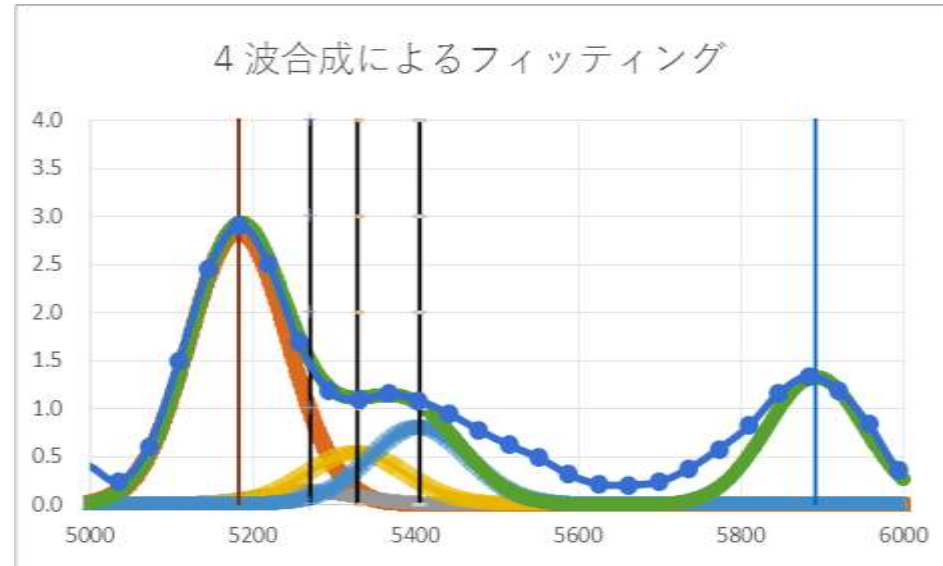
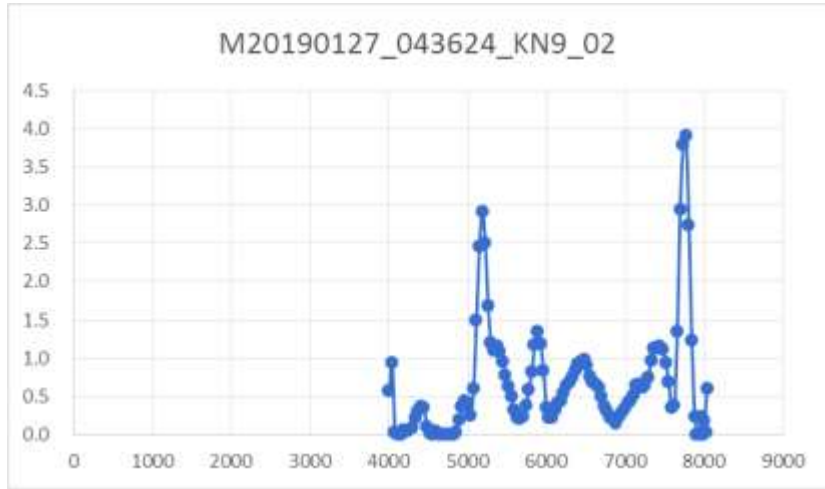


もうちょっと複雑な波形では

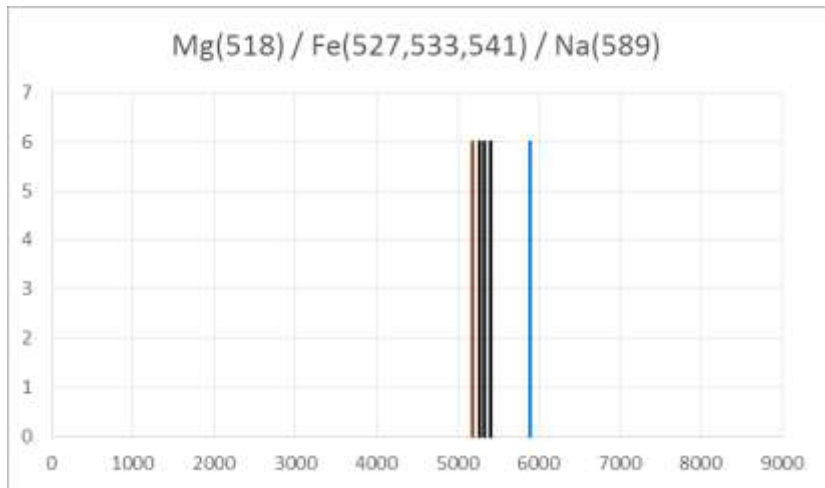


- 先ほどの流星スペクトルの 6800～7600 Å 部分を3波合成してみました
- グラフの青点線が流星スペクトルです
- 3つの波を合成したものがオレンジの波形です
- これに意味はあるのか！？
- 3つの任意の波で実際のスペクトルを再現させただけ
- 波長をMg, Fe, Naに固定して合成させれば意味はありそうです

低分散でも「鉄」を測りたい！



元素	面積比
Mg	0.506
Fe	0.024
	0.094
	0.141
Na	0.235



- 5つの波長の波を合成して流星スペクトルを再現

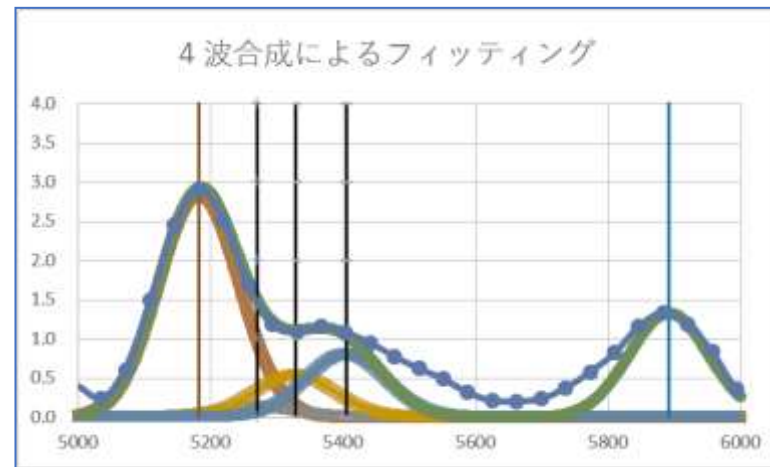
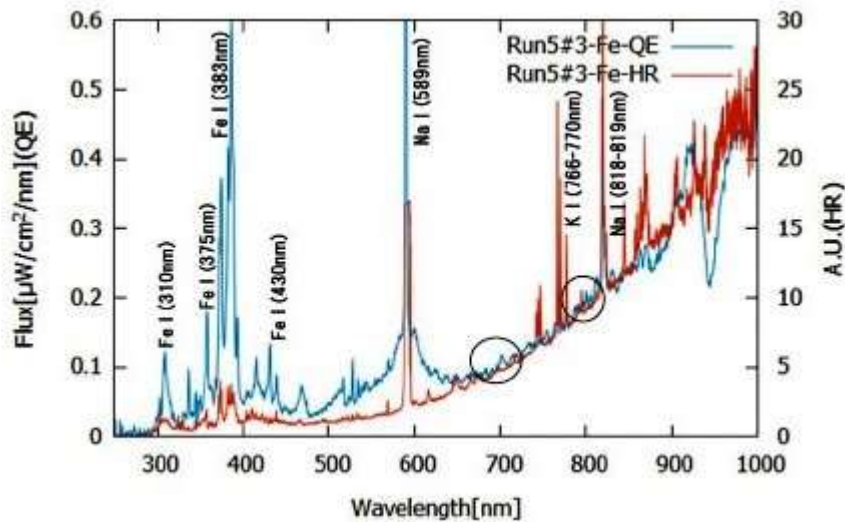
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

- この公式で標準偏差を変化させ、さらに波高値を調整するために任意の係数をそれぞれに掛けた
- わかった事 / 疑問に思っている事
 - 5波全て同じ標準偏差だった
 - ピークがズレた「山」も再現できる
 - Fel-15(527-545)は6本の合計？ / 560nm帯は(MgI-9 553, Fe)？

5269, 5328, 5371, 5404, 5431, 5449

わからない事たくさん

- 輝線面積の求め方はこれで良いのか？
 - 右の基本波を全部考慮すべきか？ → NISTだと270本



- 流星は規格化しない
 - BBは実験室の話？

Low-temperature lines		
3831	Mg I	3
3859, 3885, 3926	Fe I	4
4045, 4066, 4143	Fe I	43
4201, 4273, 4308, 4326	Fe I	42
4226	Ca I	2
4255	Cr I	1
4384, 4405	Fe I	41
4703	Mg I	11
4872, 4891, 4920, 4957, 5008	Fe I	318
5182	Mg I	2
5269, 5328, 5371, 5404, 5431, 5449	Fe I	15
5892	Na I	1

High-temperature lines		
3934, 3969	Ca II	1
4481	Mg II	4
6347, 6371	Si II	2
Wake lines		
4376, 4427, 4462, 4482	Fe I	2
4571	Mg I	1
5169, 5205	Fe I	1

Atmospheric lines and bands		
5330	O I	12
5700-6000	N ₂ 1st. positive	$\Delta\nu = 4$
6200-6800	N ₂ 1st. positive	$\Delta\nu = 3$
7000-7500	N ₂ 1st. positive	$\Delta\nu = 2$
6157	O I	10
6455	O I	9
6484	N I	21
7424, 7442, 7468	N I	3
7774	O I	1
8186, 8218, 8143	N I	2
8446	O I	4
8682	N I	1

Train lines		
5577	[O I]	3F

NIST

ASD
DATA
LINES
LEVELS
INFORMATION
List of SPECTRA
GROUND STATES & IONIZATION ENERGIES
Bibliography
Help



NIST Atomic Spectra Database Lines Data

Fe (all spectra): 270 Lines of Data Found

Example of how to reference these results:
 Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2018). *NIST Atomic Spectra Database* (ver. 5.6.1), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2019, March 3]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. DOI: <https://doi.org/10.18434/T4W30F>
[BibTex Citation](#) (new window)

Wavelength range: 527 - 545 nm
 Wavelength in: vacuum below 200 nm, air between 200 and 2000 nm, vacuum above 2000 nm
 Highest relative intensity: 740000

Query NIST Bibliographic Databases for Fe (new window)

[Fe Energy Levels](#)
[Fe Line Wavelengths and Classification](#)
[Fe Transition Probabilities](#)

Ion	Observed Wavelength Air (nm)	Unc. (nm)	Ritz Wavelength Air (nm)	Unc. (nm)	Rel. Int. (%)	A_{ki} (s ⁻¹)	Acc.	E_i (cm ⁻¹)	E_k (cm ⁻¹)	Lower Level Conf., Term, J
Fe II	527.00318	0.00003	527.00313	0.00003	700	1.52e+07	B+	84 710.749 - 103 680.689	3d ⁶ (5D) 4d	e 6G 7/2 3d ⁶ (5D ₂) 4
Fe I	527.03560	0.00008	527.03561	0.00004	288000	3.67e+06	B+	12 968.554 - 31 937.325	3d ⁷ (4F) 4s	a 3F 2 3d ⁶ (5D) 4s
Fe III			527.040	0.010		4.0e-01	D	436.2 - 19 404.8	3d ⁶	5D 3 3d ⁶
Fe II	527.10984	0.00015	527.10986	0.00003	150	2.1e+06	D+	84 710.749 - 103 676.848	3d ⁶ (5D) 4d	e 6G 7/2 3d ⁶ (5D ₂) 4
Fe II	527.22212	0.00013	527.22203	0.00004	120	4.2e+06	D+	83 990.106 - 102 952.170	3d ⁶ (5D) 4d	6D 3/2 3d ⁶ (5D ₄) 4

飽和の確認 1

すばる画像処理ソフト：マリア - M20181226_043703_KN9_02P.jpg


ファイル(F) 編集(E) 画像表示(V) 画像演算(P) 画像情報(I) データ処理(D) データ1次処理(A) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)

終了 開く 保存 印刷 FITSヘッダー 切り抜き フリック 測光 位置測定 **グラフ** コントラ ヘルプ

カー カラー 対数 0 255 自動調整 マークの非表示...

X: Y: カウント値: 平均値:

M20181226_043703_KN9_02P.jpg (1倍) [720x480x3]

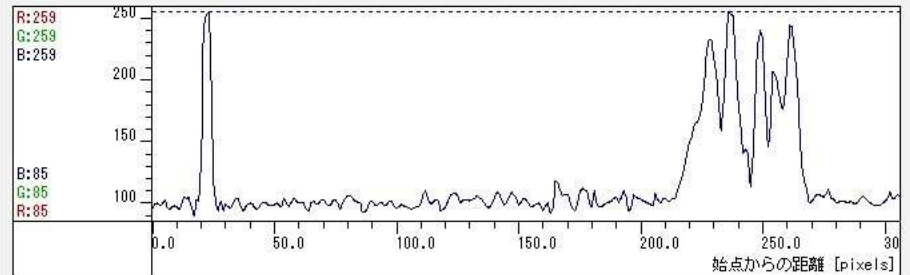


2018/12/26 04:37:03.40(LTD) 0308 V00008*121 ICX872 6mmF0.95 KN9_02

グラフ [M20181226_043703_KN9_02P.jpg]

X: Y: カウント値:

グラフ選択範囲 [115, 304]-[421, 304] 始点からの距離



R: 259
G: 259
B: 259

B: 85
G: 85
R: 85

水平倍率(M): 1.83 縦軸(V): R, G, B 対数(L) スケール設定(S)...

マーク: すべて表示(G) 別画像のグラフ表示(D) 閉じる(C)

非表示(I) 全表示(B) 消去(E) 印刷(P) テキスト出力(T)... 分散軸変更(A) ヘルプ(H)

飽和の確認 2

すばる画像処理ソフト：マリア - M20181218_012522_KN9_02P.jpg

ファイル(F) 編集(E) 画像表示(V) 画像演算(P) 画像情報(I) データ処理(D) データ1次処理(A) ウィンドウ(W) ヘルプ(H)

終了 開く 保存 印刷 FITSヘッダー 切り抜き プリント 測光 位置測定 **グラフ** コントラ ヘルプ

カラー 対数 0 255 自動調整 マークの非表示...

X: 713 Y: 182 カウント値: 79.0 平均値: 77.4

M20181218_012522_KN9_02P.jpg (1倍) [732x498x3]

2018/12/18 01:25:22.4(LT) 0362 V00005+073 ICX672 6mmF0.95 KN9 02

グラフ [M20181218_012522_KN9_02P.jpg]

X: Y: カウント値:

グラフ選択範囲 [469, 186]-[714, 186] 始点からの距離

水平倍率(M): 2.28 縦軸(V): R, G, B 対数(L) スケール設定(S)...

マーク: すべて表示(G) 別画像のグラフ表示(D) 閉じる(C)

非表示(I) 全表示(B) 消去(E) 印刷(P) テキスト出力(T)... 分散軸変更(A) ヘルプ(H)

Ternary graph

Meteor spectra from AMOS video system
 Regina Rudawska et al.
 Planetary and Space Science, Volume 123, p. 25-32
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2016P%26SS..123...25R>

No.	Na/Mg	Fe/Mg	Mg	Na	Fe
1	1.00	0.39	0.42	0.42	0.16
31	0.79	1.47	0.31	0.24	0.45
35	2.56	0.70	0.23	0.60	0.16

