

# かなた望遠鏡における自動分光観測システムの性能評価

広島大学 理学部 物理学科  
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

B195787 幸野 友哉  
主査 植村 誠 副査 伊藤 清一

2023年2月7日

## 概要

突発天体の初期の状態には新星の高励起輝線など不明な点が多くある。そのため、発見直後の追跡観測が重要である。しかし、従来の専門家が判断して行う手法では観測に専門家の立ち合いが必要で、観測機会を逃してしまいかねない。それを防ぐため、広島大学のかなた望遠鏡では自動観測システム Smart Kanata の試験運用と開発が行われている。

本研究では、Smart Kanata に搭載される予定である分光観測とスペクトルの解析の自動化システムの性能評価を行った。2022年11月から12月にかけて、31天体80回の観測を実施し、自動観測・解析に失敗するケースを精査した。結果として、自動観測に失敗する原因が目的天体の誤同定にあることが明らかとなったため、画像のフラット補正の処理と、参照カタログとの照合に用いるパラメータを改良し、成功率が10%から92%まで上昇した。また、自動解析では、CCDのピクセル座標を波長に較正する処理に失敗することがわかった。そのため、波長較正に用いる夜光のテンプレートの再作成や補正値の適正化など、波長較正の自動化アルゴリズムを改良し、スペクトルの波長較正がおおむね正しく行えるようになった。これらの改良によって得られた新星や矮新星のスペクトルは、先行研究の結果とよく一致することが確認できた。一方で、波長較正については数nmの誤差が生じることもあった。今後はシステムを引き続き改良するとともに、このシステムを Smart Kanata に取り込み、実際に突発天体の観測を行うことでその初期の状態についての情報を得ることが期待される。

# 目次

1	研究背景	4
1.1	激変星	4
1.1.1	新星	4
1.1.2	矮新星	5
1.1.3	追跡観測の意義と現状	6
1.2	自動観測システム Smart Kanata とその現状	7
1.3	研究目的	7
2	研究方法	8
2.1	観測機器	8
2.1.1	かなた望遠鏡	8
2.1.2	HOWPol	9
2.2	手動での分光観測および解析方法	10
2.2.1	分光観測の手順	10
2.2.2	分光画像データの解析の手順	13
2.2.3	スペクトルの抽出と波長較正	15
2.3	分光観測および解析の自動化システム	16
2.3.1	観測における自動化	16
2.3.2	波長較正の自動化	18
3	結果	19
3.1	試験運用の結果	19
3.2	自動観測における目的天体の同定	20
3.3	波長較正における改良	27
4	考察	31
4.1	新星・矮新星のスペクトル分析	31
4.1.1	古典新星 V1405 Cas	31
4.1.2	矮新星 SS Cyg	32
4.1.3	矮新星 Z Cam	33
4.2	天体の同定	34
4.3	自動解析	35
5	総括と展望	36
6	付録 激変星以外のスペクトル	37
7	参考文献	46

# 1 研究背景

## 1.1 激変星

激変星とは、白色矮星を主星、ロッシュローブを満した恒星を伴星とする連星系である。[1] その距離は太陽半径と同程度と非常に近く、軌道周期は数時間程度である。伴星から主星に質量輸送が起こっているため、主星の周りにはガスが円盤状に集まることで降着円盤が形成されている。激変星は、明るさの時間変化の特徴によって、新星や矮新星に分類される。

### 1.1.1 新星

新星とは、伴星から輸送されたガスが主星である白色矮星に降着し、白色矮星表面でガス中の水素が核融合反応を起こして降着ガスを吹き飛ばす爆発現象である。[2] 新星爆発時、天体の光度は図1の光度曲線のように変化する。

1. **増光初期** 数時間から数十時間程度の継続時間で急速に明るくなる。新星の発見時にはすでにこの期間を過ぎていくことが多く、スペクトルの観測例は多くない。
2. **極大前の停滞期** 極大光度に達する数日から数時間前に増光が停滞する期間。光度変化が遅い新星では観測例が多く存在する (V723 Cas や V5559 Sgr など)
3. **最後の増光期** 停滞期後、極大に向けて増光する期間。この期間の極大日と極大等級のデータは新星の距離推定に有用である。
4. **減光初期** 極大光度に達したのち、緩やかに減光する期間。減光速度は新星ごとに異なり、3等減光するのに3日程度のものや100日かかるものもある。減光スピードから新星の絶対等級が推定できる。
5. **遷移期** 減光中に、光度が正弦波のように振動したり、大きい減光の後ふたたび増光する期間。
6. **減光終期** 減光が終了し、静穏時の等級に戻る時期。この時期は光度が低いため、観測が難しい。

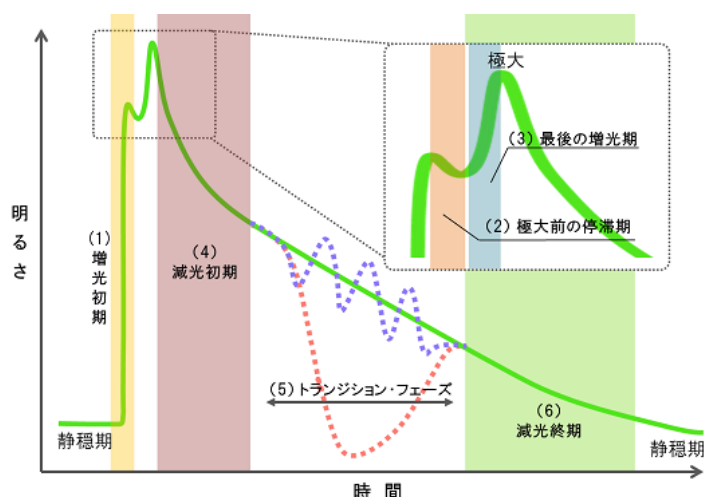


図1 典型的な新星の光度曲線 [3]

新星のスペクトルは図2のようになる。特徴としては強い水素の輝線がみられ、青方偏移した吸収線を伴うことがある。これを P Cyg プロファイルといい、これは白色矮星表面の核燃焼によって吹き飛んだガスによる放射が原因だといわれており、膨張ガスの存在を示唆している。

また、ごく初期のスペクトルに特徴的なものがあるので紹介する。図3は、増光初期にある新星 T Pyx の分光観測結果である。新星スペクトルの輝線としてよく見られる水素のパルマー線のほか、1回電離のヘリウム、2回電離の窒素、3回電離の炭素など様々な輝線がみられる。これらの輝線は温度が数万 K の高温プラズマ中で形成されるため、核融合している白色矮星表面の付近が見えている可能性を示唆している。しかし、急激増光中の分光観測例はこの1例のみとごくわずかであり、このようなスペクトルの形成原理やこのときの物理的状態は不明である。

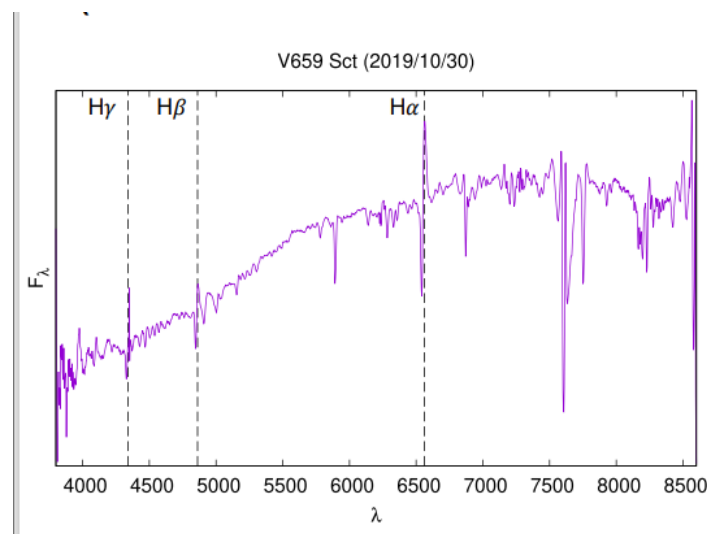


図2 典型的な新星スペクトル [4]

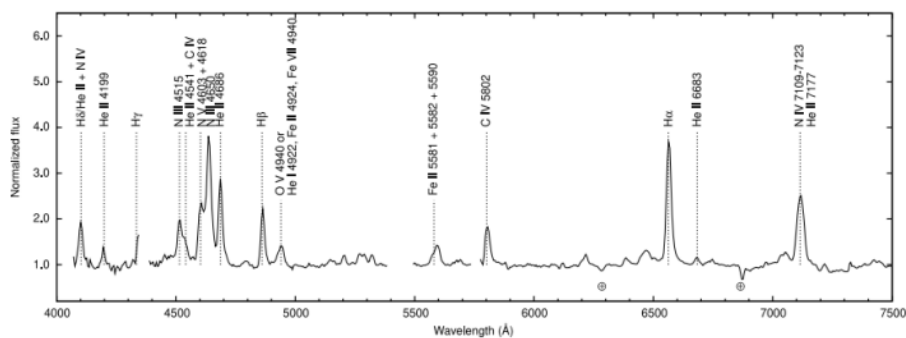


図3 T Pyx のスペクトル [5]

### 1.1.2 矮新星

降着円盤にガスがたまり、密度がある臨界に達すると、円盤が不安定となり、それまで円盤にたまった物質が粘性により角運動量を失って一気に白色矮星に降着し、重力エネルギーを解放して円盤の光度が上がる。こ

の現象を矮新星アウトバーストといい、2等から5等程度の増光が見られる。大きな特徴として、図4のように周期的に増光する(典型的には10–数百日)。増光期間や振幅が大きいスーパーアウトバーストを起こすSU UMa型やWZ Sge型など、いくつかの型が存在する。WZ Sge型では降着円盤の構造に起因すると考えられている早期スーパーハンプ現象が観測されるが、アウトバースト初期にしか現れないため、その機構や円盤構造はよく理解されていない。

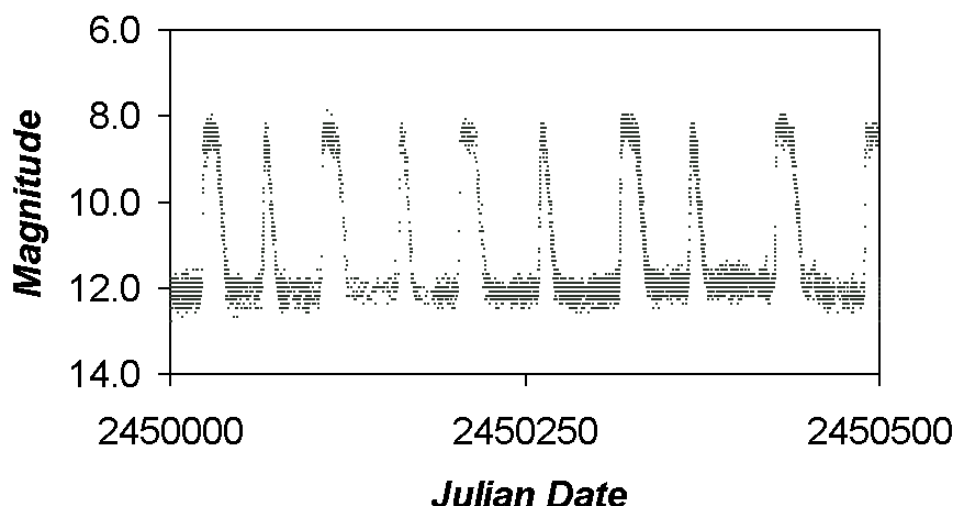


図4 はくちょう座SS変光星の光度曲線(AAVSO)\*1

### 1.1.3 追跡観測の意義と現状

1.1.1節で述べた新星初期の特徴的なスペクトルや、1.1.2節で述べた降着円盤の構造のように、激変星には未解明な物理が多く存在する。これらの現象の理解があまり進んでいない理由は、ごく初期を観測したデータが少ないためである。

現在、様々な全天サーベイ観測プロジェクトにより日々多数の突発現象が報告されている。例えば、超新星の発見を主目的とし、オハイオ州立大学を中心とするプロジェクトであるASAS-SN(All-Sky Automated Survey for SNe)やカリフォルニア工科大学などが参加するZTF(Zwicky Transient Facility)などがある。これらのプロジェクトにより自動的に検出される多数の突発現象は、共有データベースであるTNS(Transient Name Server)に報告されている。TNSに報告される突発現象には、新星や矮新星のごく初期の状態が含まれている。

しかし、その全てを観測することは難しいほか、新天体は発見当初は座標と発見時の明るさの情報しかないので、天体の型の不確定度が高く、新星や矮新星以外の天体であることが多い。例えば、新星や矮新星と混同されやすい変光星型にミラ型が存在するが、これは脈動変光星と呼ばれ、星自身が膨張と収縮を繰り返すことで変光を繰り返す。その光度の振幅が2等から10等程度と大きいため、未知のミラ型変光星は極大時に突発天体として検出される恐れがある。極小期の観測ができれば区別できるものの、ミラ型変光星の周期は80日から1000日と幅があり、数年周期の場合、矮新星との混同の恐れがある。ほかに恒星や降着円盤での磁場エネルギー解放によりフレアを起こすフレア型変光星は、変光タイムスケールが数秒から数時間と短いため、フ

\*1 [https://www.aavso.org/vsots\\_sscy](https://www.aavso.org/vsots_sscy)

レア中の観測点が少ない場合に混同が予想される。したがって、突発現象の種類を素早く判断して適切な追跡観測（連続撮像、偏光、分光など）を行い、天体の型を確定させる必要がある。その際に必要な追跡観測の手法は天体ごとに異なるため、手法を正しく判断し実行する必要がある。

この追跡観測の意思決定について、以前は天体の特徴や必要な観測に精通した観測者による判断が行われてきた。そのため観測者の立ち合いが必要であり観測機会の減少につながっていた。そこで最近では情報理論の仕組みを利用した、プログラムによる天体の型や追跡観測手法の自動判定システムを整備することで、この意思決定を自動化する試みが行われている。

## 1.2 自動観測システム Smart Kanata とその現状

Smart Kanata(SmartK)とは、広島大学のかなた望遠鏡で試験運用と開発を進めている自動観測システムである。SmartKは新天体の情報を収集し、それがどのような天体にあたるかを判別し、追跡観測を行うか否か、手法は何を用いるかを決定し、自動で観測を行う。SmartKのおおまかなシステムは以下のとおりである。

1. 10分に一度オンラインデータベースを参照し新天体情報を入手する。
2. 入手したデータ(座標、振幅、距離 etc.)をもとに機械判別モデルに基いて天体の型を判別し、情報理論の枠組みを利用して、最も効果的な追跡観測の手法を決定する。
3. 時刻、天候、天体位置などのステータスを確認し、観測可能と判断されれば望遠鏡を駆動、観測を行う

SmartKが用いるデータベースは前述のASAS-SNとTNSのほか、Central Bureau for Astronomical Telegrams ”Transient Objects Confirmation Page”(TOCP、IAU管轄の旧式サービスで発見者が手動で突発現象を登録できる)がある。TNSはほぼすべての突発現象を対象とするが、速報性が各プロジェクトのデータベースと比べ低いことが予想されるため、SmartKでは速報性の高いASAS-SNと一部TNSに登録されない情報をもつTOCPを併用している。

SmartKは天体の型判別と追跡観測の手法決定を情報エントロピーとそれから求められる相互情報量を利用して決定する。情報エントロピーとは不確実性を数値化したものであり、その数値が高いほど不確実性が大きいことを示す。相互情報量とは追跡観測前後の情報エントロピーの値の差を示したものであり、大きいほど天体の型判別における不確実性が減少することになる。現在のSmartKは連続撮像、分光観測、多色撮像の3種の追跡観測の手法を想定しており、3種それぞれの観測を行った際の情報エントロピーの期待値および相互情報量を計算し、もっとも相互情報量が高い手法を用いて追跡観測を実行する。

現在SmartKは、突発現象の型の判定および追跡観測の手法の決定を行うシステム [6]、および連続撮像の自動化システム [7] が実装されており、そのほかの観測の自動化システムの開発および実装済みシステムの改良が行われている。現在のシステムにより、WZ Sge型矮新星のアウトバースト初期の連続撮像観測が可能である。その一方、自動分光観測機能が実装されておらず、新星爆発初期の研究は進んでいない。

## 1.3 研究目的

SmartKに未実装である追跡観測の自動化システムのうち、分光観測に関するシステムの開発が進行している。本研究では開発中の自動分光観測システムの性能評価を行い、発生した問題の解決およびシステムの確立を目指す。

## 2 研究方法

この章では、望遠鏡と観測機器の概要の紹介と、分光観測の方法およびデータ解析の方法について述べる。

### 2.1 観測機器

#### 2.1.1 かなた望遠鏡

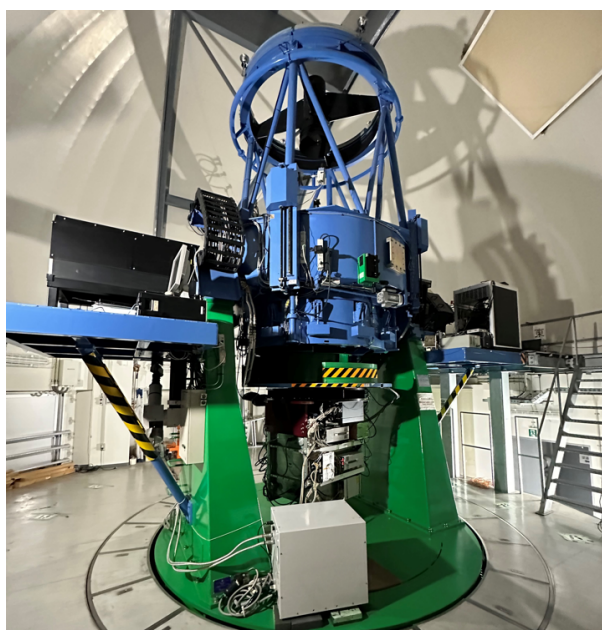


図5 かなた望遠鏡

図5は今回の研究で用いたかなた望遠鏡である。かなた望遠鏡は広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台に設置された、有効口径1.5mの可視近赤外望遠鏡である。国内に設置されている望遠鏡では最大級の口径と駆動速度を誇る。かなた望遠鏡は第3鏡として平面鏡を備えており、この着脱によりナスミス焦点かカセグレン焦点に像を結ぶことができる。それぞれの焦点には検出器 HOWPol(ナスミス焦点), 検出器 HONIR(カセグレン焦点、今回の研究では使用しない) が装着されている。

表1にかなた望遠鏡の主な諸元を示す。



表1 かなた望遠鏡の諸元 (広島大学宇宙科学センター)

光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡の有効径	1500mm
主鏡材	ULE(Ultra Low Expansion; 超低膨張) ガラス
合成 F 値と焦点距離 f	F/12.2 f=18,300mm (F/12.3 f=18,501.7mm)
視野	直径 15 分角 (=0.25 度)
焦点面スケール	11.271 秒角/mm(11.148 秒角/mm)
架台	経緯台 最大角速度 方位軸まわり 6 度/秒 高度軸まわり 3 度/秒
総重量	約 17t
搭載可能重量	カセグレン焦点 500kg ナスミス焦点 1000kg

### 2.1.2 HOWPol

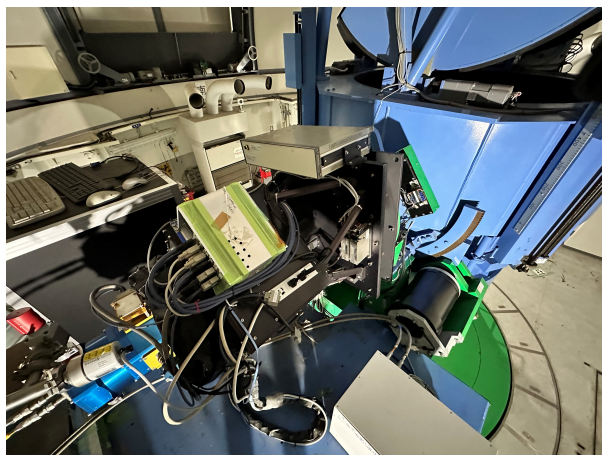


図6 HOWPol

図6は、かなた望遠鏡のナスミス焦点に取り付けられている可視広視野カメラ HOWPol(Hiroshima One-shot Wide-field Polarimeter)である。HOWPolは、一回の露光で直線偏光パラメータを導出できる偏光系を備えている。また、広視野撮像モードのほか、偏光撮像と分光のモードを搭載している。フィルターは主に可視光で、近赤外領域の感度を高めるため完全空乏型 CCD を使用している。

表2に HOWPol の主な諸元を示す。

表 2 HOWPol の諸元 (広島大学宇宙科学センター)

波長	0.45–1.03 ミクロン
視野 (広視野撮像モード)	15 分角
(偏光撮像)	7'×7'(wide),15'×1'(narrow)
(分光)	2.3"×15'
フィルター	B,V,R,I,z',H-alpha
グリズム	Low-res(Grism 420/mm, 620nm blaze, R 400)
ウォラストンプリズム	(Both) Wedged double Wollaston prism (Wide) Made of six rutile blocks (Narrow) Six magnesium fluoride blocks and two fused silica wedges
CCD	Two fully depleted 2k-4k CCDs, 200 micron-thick depletion layer
検出限界等級 (測光)	$R=19.2$ (10 分露光, $\Delta R=0.02\text{mag}$ )
(偏光測定)	$R=16.0$ (偏光測定、10 分露光, $\Delta P=0.2\%$ )

## 2.2 手動での分光観測および解析方法

この節では、かなた望遠鏡の HOWPol 検出器を用いた自動分光観測システムの開発を行うにあたり、観測とデータ解析で自動化すべき内容について述べる。

### 2.2.1 分光観測の手順

HOWPol ではスリット分光によりスペクトルを取得する。スリット分光とは、スリットとよばれる細長い小窓を望遠鏡焦点面に置き、そこを通った光を分散素子で分散させて天体のスペクトルを得る方法である。図 7 から図 11 は、分光観測を行う際に得られる画像である (天体は矮新星 Z Cam)。これらの画像では上方向が北方向 (赤緯が増す方向)、右方向が東方向 (赤経が増す方向) である。本論文では画像右下を原点に、画像の横軸を左向きに  $x$  軸、縦軸を上向きに  $y$  軸をとり、画像中のピクセル座標を  $(x, y)$  と表現する。観測手順は以下のとおりである。

1. 図 7 のように分光を行う目的天体の周辺を撮影する。その後、図 7 の画像と図 8 のような他望遠鏡によって得られた当該領域の既存の画像を照らし合わせ、目的天体を同定し、その座標を記録する。
2. HOWPol 内で光路にスリットを挿入して撮影を行う。その結果、図 9 のような画像が得られるので、画像からスリットの座標を得る。この際、1. で得た天体の  $x$  座標と近いスリットの  $(x, y)$  座標を記録する。
3. 1. と 2. で得た天体とスリットの座標から望遠鏡の方向を微調整し、図 10 の黄丸のように天体の光をスリットの中に入れる。
4. HOWPol 内で分光素子であるグリズムを入れ、図 11 のような画像を得る。この画像の縦方向が分散方向であり、黄枠内に目的天体のスペクトルが映っている。この画像に次節で述べる処理を行うことで、スペクトルのグラフが得られる。



図7 目的天体 Z Cam 周辺の画像 (赤丸内が Z Cam)



図8 カタログにおける Z Cam 周辺の画像。HOWPol で撮影した画像は左右反転するため、この画像も左右反転してある \*2

---

\*2 <https://archive.stsci.edu/dss/index.html>

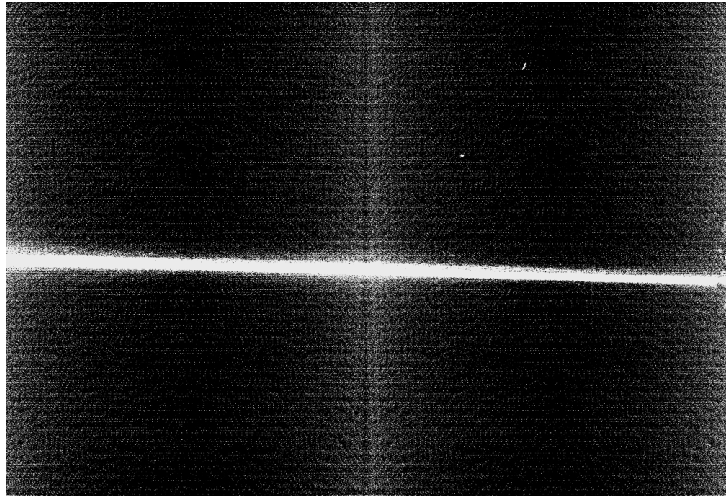


図9 スリットの画像

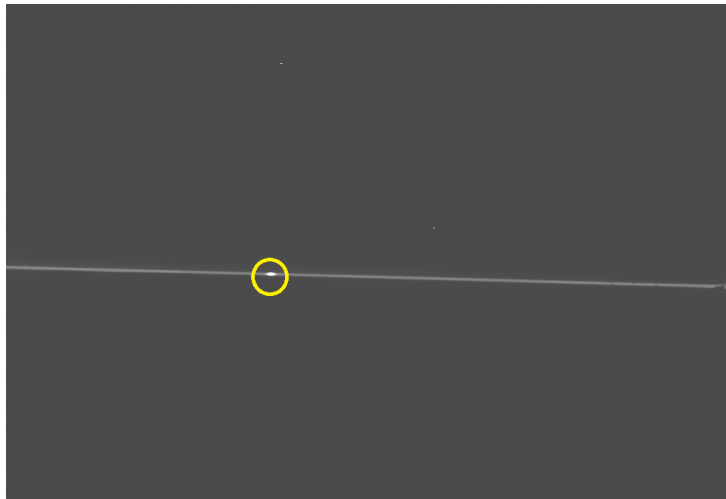


図10 微調整後の画像。黄色の円内に目的天体が導入されている。

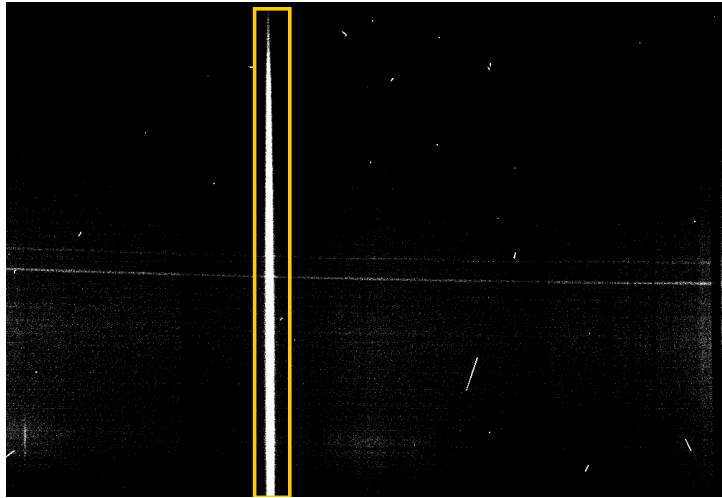


図 11 分光画像

### 2.2.2 分光画像データの解析の手順

観測により得られたデータは、天体からの信号以外にノイズを含め様々な信号が含まれている。そのため、そのままでは解析を行うことができないので、それらの不要な信号を取り除く、もしくは補正する必要がある。一次処理とは、天体起源でない信号を取り除く処理である。HOWPol の CCD 画像データに対して一次処理で行う作業は、バイアス引きとフラット補正である。

#### バイアス引き

バイアスとは、露光時間ゼロで CCD を読みだした際のデータである。露光しないので本来データはゼロになるはずだが、実際に観測する際は CCD から読みだした値が負にならないよう、あらかじめ CCD には電圧がかけられ、データが人為的に底上げされている。これは、CCD からの読み出し値は AD 変換のノイズによりある程度の不定性があり、変換後の数値として負の値は読み込めないため、入射光子 0 個でも扱えるようにするための措置である。[8] 観測で取得した生データにはこのバイアスが含まれているため、露光時間ゼロで撮影したバイアス画像を差し引く必要がある。

生データにはオーバースキャン領域といわれる黒い線の領域が存在する。これは、検出器の読み出しの際余分に読みだされる領域であり、天体およびスカイからの光を受けていないバイアス信号のみが記録されている [9]。この領域を用いてバイアス信号を差し引き、分割された画像を一つに統合する処理を行う。露光時間ゼロで取得したバイアス画像に、このオーバースキャン領域処理を施した画像を、天体画像から差し引く。

図 12 は、バイアス引きを行う前と行った後の画像である。

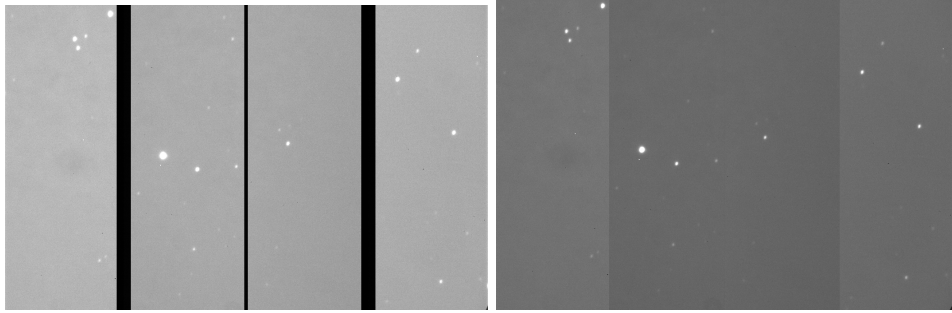


図 12 バイアス引き前後の画像。左がバイアス引き前、右がバイアス引き後

### フラット補正

検出器の感度は 1 画素ごとにある程度異なる。また、光学系やフィルターの汚れなど様々な要因により、CCD の読み取り感度に不規則なムラが生じるため、この影響を取り除く必要がある。そのため、次のような操作を行う。まず、一様な光源の光を望遠鏡に入射させ、検出器で読み出した画像を作成する。この画像にバイアス引きを施し、カウントの最大値が 1 程度になるように規格化すると、フラットフレームとよばれる画像が得られる。このフラットフレームでバイアス引き後の画像を割り、規格化する操作がフラット補正である。

図 13 は、フラットフレームと図 12 の画像をフラット補正した画像である。

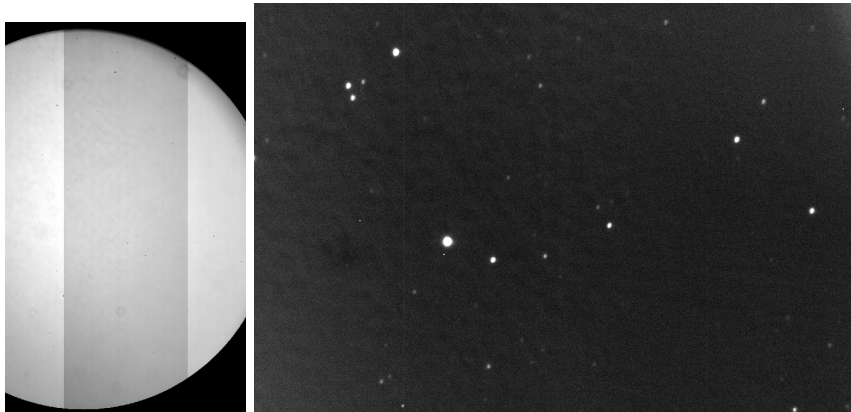


図 13 左はフラットフレーム、右はフラット補正を行った画像

### 2.2.3 スペクトルの抽出と波長較正

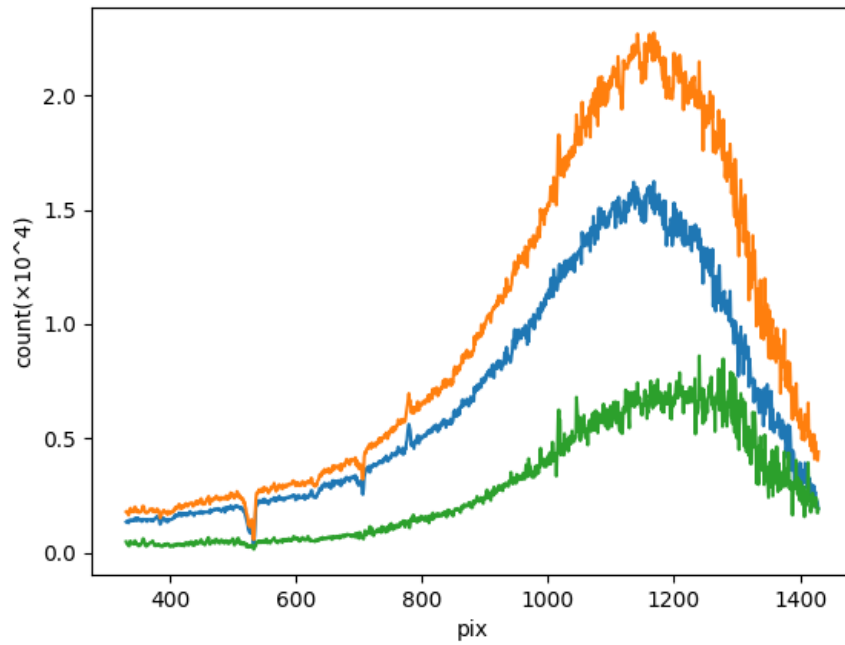


図 14 Z Cam のスペクトル。オレンジが天体と背景の夜光成分の両方を含み、緑が夜光由来、青が天体由来のもの

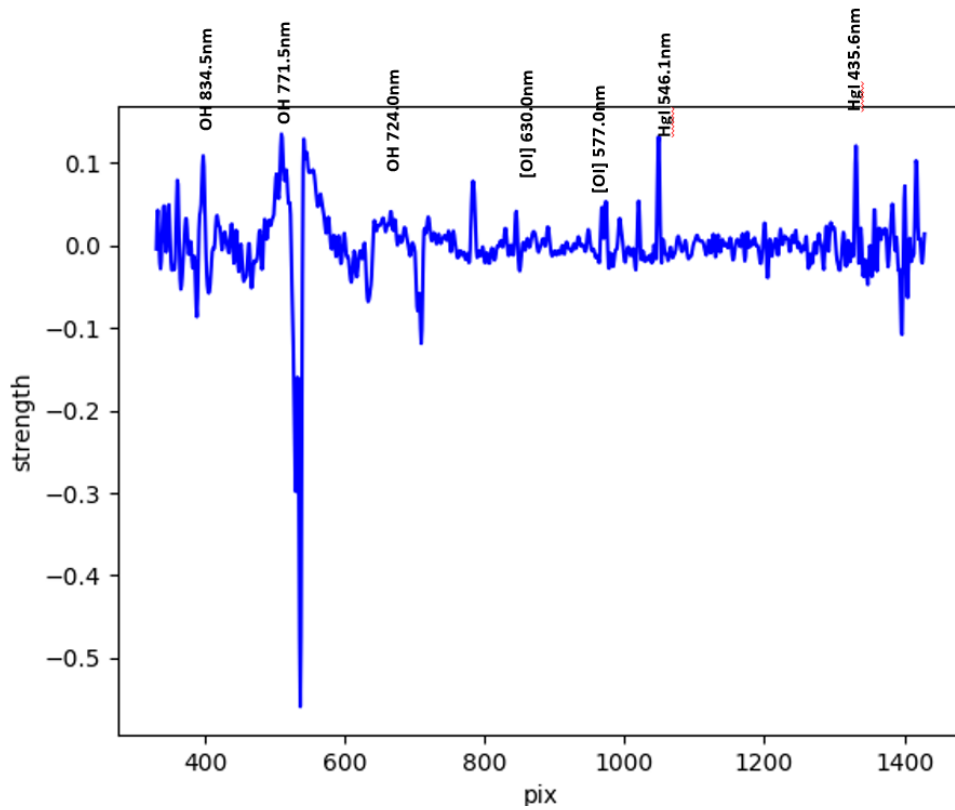


図 15 夜光スペクトルの例

図 11 のような分光画像に対してバイアス引きとフラット補正を施したのち、天体のスペクトルが写っている黄色枠内を  $x$  方向に足し合わせると、図 14 のオレンジ線のようなスペクトルを得ることができる。これには夜光など天体以外の光による背景光も含まれる。背景光のスペクトルは、図 11 黄色枠の近くの領域を天体スペクトルの処理と同様の処理を施すことで、図 11 の緑線のように得られる。それを差し引いて天体由来のスペクトル (図 14 の青) を得る。

観測データからは分散方向の波長の情報については、ピクセル座標でしか得られないため、ピクセルと波長の間係を決定する必要がある。これを波長較正という。波長較正は、HOWPol/かなた望遠鏡では夜光のスペクトルの輝線を基準にして決める方法が用いられる。図 15 のように、いくつかの夜光輝線については波長に対応するピクセル座標がわかるので、そのデータを多項式などを用いて内挿・外挿することで、ピクセル座標から波長へ変換する。

## 2.3 分光観測および解析の自動化システム

この章では、前章の手動観測を自動化する際の処理について説明する。

### 2.3.1 観測における自動化

観測において自動化する必要がある作業は、目的天体とスリットの座標の検出および、望遠鏡の方向の微調整である。これらを実現するため、今回のシステムは以下の処理を行う。



1. 望遠鏡を目的天体の方向に向ける
2. 目的天体周辺の画像を取得したのち、そこに映る光源を星として検出し、検出した星のピクセル座標を得る。
3. 目的天体に近い星のデータを Gaia DR3 カタログより入手し、星の位置と Gaia カタログの星の位置を合わせる
4. 検出した星のうち、Gaia に登録されている星を選定する。
5. ピクセル座標  $(x, y)$  と赤経赤緯座標  $(\alpha, \delta)$  の変換式を決定する。その後、目的天体の赤経赤緯座標  $(\alpha_{obj}, \delta_{obj})$  をピクセル座標  $(x_{obj}, y_{obj})$  に変換する。
6. 観測画像から検出した星のなかで、 $(x_{obj}, y_{obj})$  に最も近い星を目的天体と同定する。
7. スリット像のテンプレートをを用いて、目的天体を移動させるスリットの座標を決定する。
8. 望遠鏡の方向を微調整し、天体の光をスリットに入射させ、分光観測を行う。

3章で述べる様に、これらの手順のうち、1、7、8については開発済みの自動化システムが安定して動作している。以降ではそれ以外の部分について述べる。かなた望遠鏡の指向精度は平均的には数秒角だが、気温や方向により数十秒角の誤差が生じることもあり、CCDの視野中心に最も近い天体を単に目的天体と同定することはできない。したがって、周囲の星の配置をもとに、目的天体を自動で同定する作業を行う必要がある。

図16は上記の作業のうち、目的天体の同定作業(2-6)に関する成功例を示している。データは2.2.1、2.2.2節で示した矮新星 Z Cam の画像を使用している。図中の赤点は取得した画像から検出された星の位置を示す。紫点は Gaia DR3 カタログに記載されている目的天体に近い星の位置であり、赤点を紫点に近づけるように処理したものが青点である。図では青点は紫点とほぼ重なっており、検出した星(青点)と、それぞれに最も近い Gaia カタログの星(紫点)の組が決まる。目的天体の座標は図中の(0,0)であり、検出した星のうちそこに最も近い星が目的天体と同定できる。

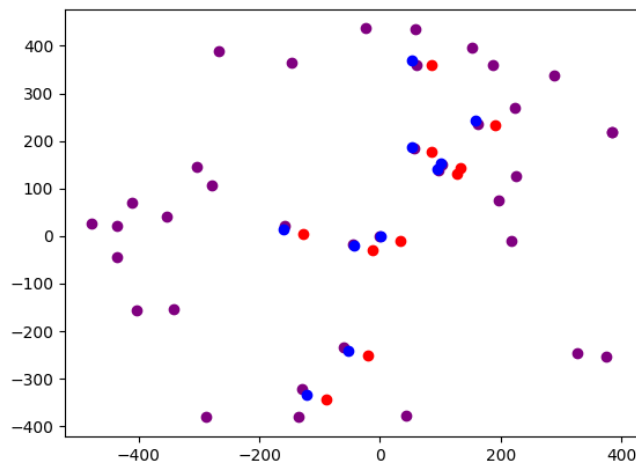


図16 自動観測システムで星を検出した位置(赤)、カタログの星の位置(紫)、紫と合うように赤を動かした位置(青)

### 2.3.2 波長較正の自動化

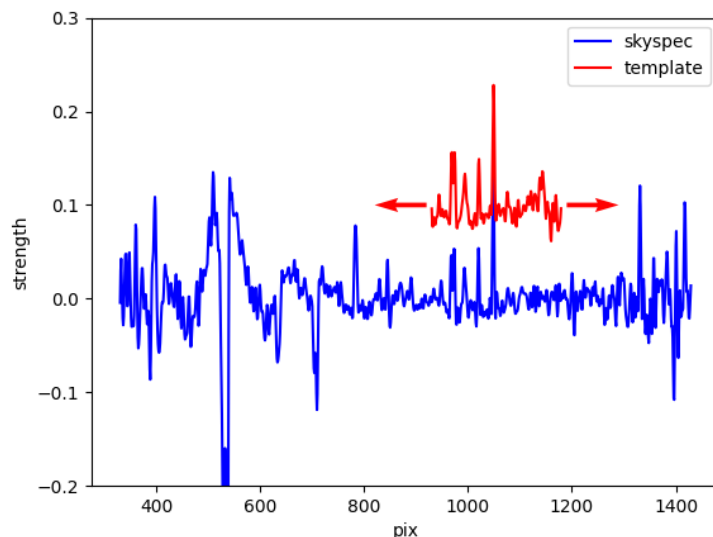


図 17 図 14 の夜光スペクトル

波長較正の自動化においては、夜光のスペクトルを基準に行う。解析の自動化について、バイアス引き、フラット補正については分光観測以外でも共通の画像処理であり、既に自動化には実績がある。また、スペクトルの一次元化と背景光の除去についても開発済みのシステムが安定して動作している。ここでは後述のように、処理に失敗することが多い波長較正の自動化について詳しく述べる。

まず、2.2.3 節の方法で、ある画像に対してあらかじめピクセル座標と波長の対応付けを行う。そして、その画像から特徴的な夜光輝線が多い波長域を選んで、夜光スペクトルのテンプレートを作成する。そして、このテンプレートと、画像から切り出した夜光スペクトルとの各所で相関係数の計算を行う。そして、相関係数が最も大きくなる箇所をもとに、ピクセルと波長の対応式を作成し、波長較正によりスペクトルの波長を決定する。

本節で述べた分光観測、および解析の自動化システムは、SmartK チームによって 2022 年 8 月までに、矮新星 SS Cyg をサンプル天体として開発されてきた。本研究は SS Cyg を含む激変星やその他の天体に対して、そのシステムを試験し、動作の安定性や問題点を調べ、システムの改良を行う。

### 3 結果

#### 3.1 試験運用の結果

本研究では、2022年11月21,24,30日に開発中の自動分光観測システムの試験を行った。表3に観測日時と天体、および自動分光観測の成否を乗せる。

表3 自動観測を行った天体および観測日時と観測結果

日付	時間 (世界標準時)	天体名	データ番号	成功/失敗
11/21	13:03:17	BL Lac	HP0289012-HP0289015	失敗
	13:14:06	M74	HP0289016-HP0289019	失敗
11/24	15:21:48	M74	HP0289199-HP0289202	失敗
	15:31:03	V1405Cas	HP0289203	失敗
11/30	16:00:33	Z Cam	HP0289651	失敗
	16:10:10	V1159Ori	HP0289652	失敗
	16:17:36	V1405Cas	HP0289653-HP0289656	成功
	16:33:22	GD71	HP0289657	失敗
	16:38:59	LTT2514	HP0289658	失敗
	16:44:26	GD140	HP0289659	失敗

試験運用を通して、現状の自動分光観測システムでは観測に失敗する確率が高いことが分かった。観測に失敗する原因は、2.3.1節で述べた処理の2、つまり目的天体の同定であった。また、自動解析では、波長較正を行う際、図18のように実際の波長とプログラムが判断した波長に数千Åのずれがあることが明らかとなった。以下では自動観測と自動解析、それぞれの問題点について、原因と改良点を述べる。

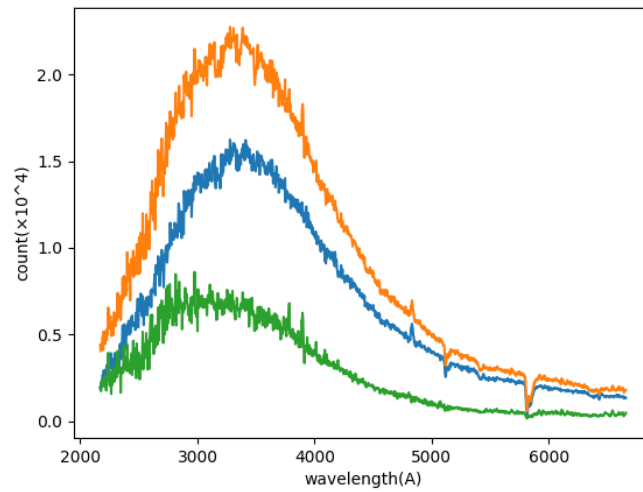


図 18 自動解析システムの波長較正の失敗例。本来は 4000–8500 Å の波長範囲になるはずだが、2000 Å ほど短くなっている

### 3.2 自動観測における目的天体の同定

この節では、目的天体を同定する作業において生じた問題とその改良点を述べる。

従来の処理では V バンドフィルター (550nm 前後の光を通す) を通して撮影したフラット画像を用いて、取得した画像にフラット補正を施し、その画像から星を検出していた。画像から星を検出する閾値が高いと、図 19 のように、検出される星の数が少な過ぎるために、目的天体の同定に失敗する。したがって、閾値の調整による適正化を試みたが、逆にこの閾値を下げると、図 20 のように、画像下部に偽の星が検出され、やはり目的天体の同定に失敗する。これら偽の星が検出される原因は、フラット補正の系統誤差が原因であることがわかった。図 21 は V バンドフラット画像でフラット補正を行った画像である。図からわかるように、画像下部で系統的に明るくなっており、星を検出する閾値を下げると、この領域で多くの偽の星が検出されてしまう。よって、フラット補正を行わずに星の検出を行うようにシステムを変更して、2022 年 12 月 2 日から 20 日まで試験運用を行った。

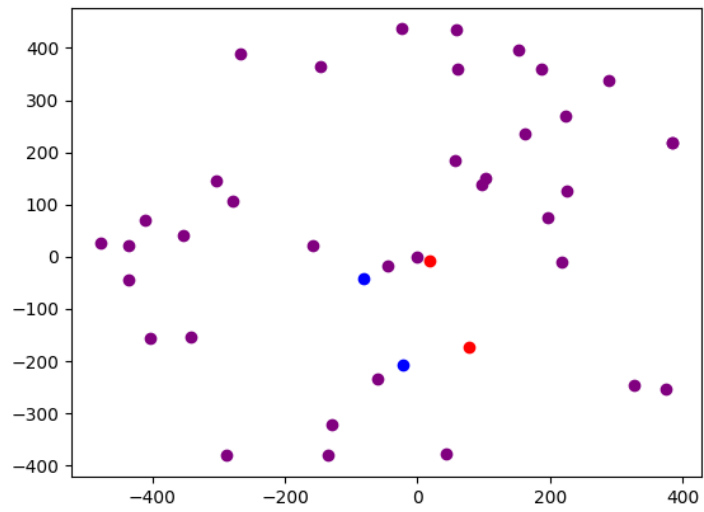


図 19 Z Cam の観測における星検出の失敗例 (HP0289651, 各点の意味は図 16 と同様)

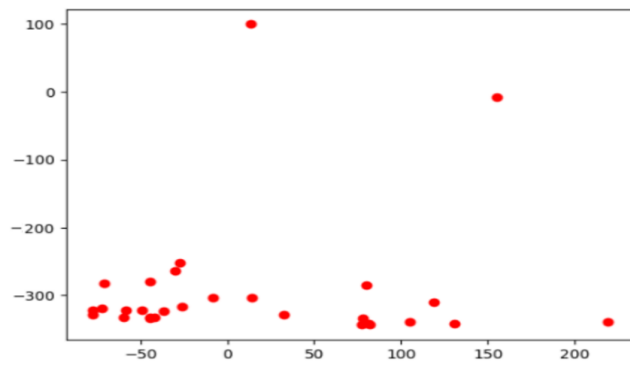


図 20 HILT600 における自動観測の失敗例。左は天体画像、右は星を検出した位置のプロット



図 21 V バンドフラット画像によるフラット補正を行った画像

表 4 は、フラット補正無しでの観測結果である。

表4 自動観測を行った天体および観測日時と観測結果(フラット補正無し)

日付	時間 (世界標準時)	天体名	データ番号	成功/失敗
12/2	11:05:09	SS Cyg	HP0289762-HP0289765	成功
	11:16:44	BL Lac	HP0289766-HP0289769	成功
	11:27:52	V1405Cas	HP0289770-HP0289773	成功
	11:40:22	Z Cam	HP0289774-HP0289777	成功
	13:16:56	GD71	HP0289784-HP0289787	成功
	13:36:24	Feige25	HP0289789-HP0289792	成功
	13:44:51	HILT600	HP0289793	失敗
	13:49:07	Feige11	HP0289794-HP0289797	成功
	13:57:29	G191-B2B	HP0289798-HP0289801	成功
	14:06:08	Hilt102	HP0289802-HP0289805	成功
	14:14:12	PG0205+134	HP0289806-HP0289809	成功
	14:22:03	PG0823+546	HP0289810-HP0289813	成功
	14:29:46	BD+75d325	HP0289814-HP0289817	成功
	14:39:24	Feige15	HP0289818-HP0289821	成功
	14:48:32	BD+08d2015	HP0289822-HP0289825	成功
	14:56:12	PG0934+554	HP0289826-HP0289829	成功
	12/6	14:26:53	Feige11	HP0289985-h0289988
14:46:52		V1405Cas	HP0289989-HP0289992	失敗
14:55:38		Feige15	HP0289993-HP0289996	成功
15:03:04		HILT600	HP0289997	失敗
15:07:27		GD71	HP0289998-HP0290001	成功
15:16:00		Z Cam	HP0290002-HP0290005	成功
15:24:30		G191-B2B	HP0290006-HP0290009	成功
15:31:34		PG0823+546	HP0290010-HP0290013	成功
15:38:02		BD+08d2015	HP0290014-HP0290017	成功
15:50:39		AGK+81d266	HP0290018-HP0290021	成功
15:58:07		Feige34	HP0290022-HP0290025	成功
16:06:29	PG0918+029	HP0290026-HP0290029	成功	
12/9	12:34:53	SS Cyg	HP0290117-HP0290120	成功
	12:46:39	BD+28d4211	HP0290121-HP0290124	成功
	12:53:48	BD+25d4655	HP0290125-HP0290128	成功
	13:05:34	BL Lac	HP0290130-HP0290133	成功
	13:12:24	Feige11	HP0290134-HP0290137	成功
	13:19:22	V1405Cas	HP0290138-HP0290141	成功
	13:26:06	Feige15	HP0290142-HP0290145	成功
	13:32:34	HZ2	HP0290146-HP0290149	成功
	13:39:12	HZ14	HP0290150-HP0290153	成功
	13:45:43	Z Cam	HP0290154-HP0290157	成功

	13:51:43	Hilt102	HP0290158-HP0290161	成功
12/13	11:06:16	SS Cyg	HP0290214-HP0290217	成功
	11:08:45	G93-48	HP0290218-HP0290221	成功
	11:15:26	Wolf1346	HP0290222-HP0290225	成功
	11:22:33	BL Lac	HP0290226-HP0290229	成功
	11:29:39	Z Cam	HP0290230-HP0290233	成功
	11:37:17	G191-B2B	HP0290234-HP0290237	成功
	11:49:52	Feige25	HP0290239-HP0290242	成功
12/20	14:33:31	V1405Cas	HP0290400-HP0290403	成功
	14:44:40	Feige15	HP0290404-HP0290407	成功
	15:15:46	PG0205+134	HP0290408-HP0290411	成功
	15:29:20	HZ2	HP0290413-HP0290416	成功
	15:39:42	G191-B2B	HP0290417-HP0290420	成功
	15:48:07	Z Cam	HP0290421-HP0290424	成功
	15:56:12	Feige34	HP0290425-HP0290428	成功

表 4 からわかるようにフラット補正を省略することで自動観測システムの成功率が大幅に高まった。なお、本来はフラット補正を行うことで星の明るさが正確に測定できるようになる。しかし、目的天体の同定において必要なことは星の位置の測定であり、星の明るさを測定する必要はないため、フラット補正は必ずしも必要ではない。より系統誤差の少ない、正確なフラット画像が得られればフラット補正を行うべきだが、フラット画像は望遠鏡の鏡の状態などの影響を受け、時間とともに変化してしまう。したがって、フラット補正無しで自動分光観測の天体検出に成功するのであれば、システムとしては安定するために、フラット補正無しで当面はシステムを運用することにした。

表 4 は失敗した例を 3 つ含んでいる。これらは依然として目的天体の同定に失敗しており、以下では典型例として 12/6 に観測した HILT600 について詳細を述べる。

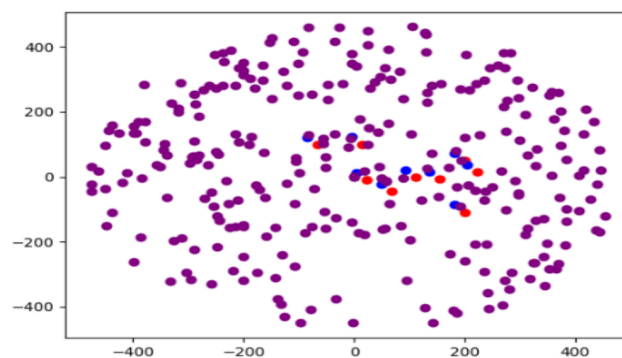


図 22 HILT600 における自動天体検出の結果 (各点の意味は図 16 と同様)



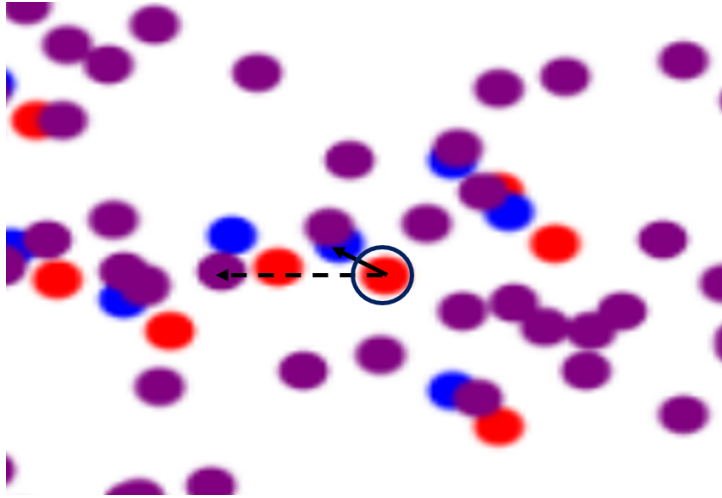


図 23 図 22 の拡大図 (各点の意味は図 16 と同様)

HILT600 の観測画像を用いてプログラムによる星検出を行うと図 22 のような結果となった。図 22 では、Gaia カタログから抽出した星 (紫点) が多いため、目的天体が誤った星に同定されたと考えられる。

このプログラムは、画像から検出した星の位置とカタログの星の位置を合わせる際に勾配法を用いており、以下のような処理を行っている。取得した画像の星の位置をベクトルで  $\mathbf{x}_{\text{obj},i}$ 、そこから最も近い位置にある Gaia カタログの星の位置をベクトルで  $\mathbf{x}_{\text{gaia},i}$  とすると、2 点間の距離は  $d_i = \|\mathbf{x}_{\text{obj},i} - \mathbf{x}_{\text{gaia},i}\|_2$  となる。これをすべての星について足し合わせた、 $S(\mathbf{x}_{\text{obj}}) = \sum_i d_i$  が目的関数であり、これを最小化するように  $\mathbf{x}_{\text{obj},i}$  を最適化する。現在の位置をベクトルで  $\mathbf{x}_n$  とし、次の位置  $\mathbf{x}_{n+1}$  を  $\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n - \eta \nabla S$  として計算し、 $\mathbf{x}$  を更新していく。なお、 $S$  の勾配  $\nabla S$  は数値的な微分  $\nabla S = [S(\mathbf{x}_{\text{obj}} + \varepsilon) - S(\mathbf{x}_{\text{obj}} - \varepsilon)]/2\varepsilon$  によって求める ( $\varepsilon$  は微小量)。

たとえば図 23 では、円で囲まれた赤点 (検出した星) の位置は本来点線矢印の先にある紫点 (カタログの星の位置) と対応しているが、誤って実線矢印の先の紫点に対応していると判断され、青点に移動している。これが目的天体が誤同定された原因である。

そこで、一部の天体が正しく検出できない問題について、勾配法のパラメータである 1 ステップごとの更新量  $\eta$ 、Gaia カタログから読み取る星の数が重要であると考えた。また、星を検出する際には daofind<sup>\*3</sup> を利用し、このツールは背景光のカウントを  $c_{\text{bkg}}$  として、カウントが  $c = ac_{\text{bkg}}$  を超える部分を星と判断している。したがって、 $a$  を適正な値に調整して、検出する星の数を適正にすることも重要である。よって勾配法のパラメータや  $a$  の値、Gaia カタログから抽出する星の明るさを調整し、より同定に成功しやすくなるように改善を試みた。変更内容は表 5 のとおりである。

\*3 <https://photutils.readthedocs.io/en/stable/api/photutils.detection.DAOStarFinder.html>

表5 パラメータの変更内容

	変更前	変更後
$\eta$	0.01	0.03
Gaia カタログの星	> 16 mag	> 15 mag
a	10	100

ただし、検出数  $N < 5$  なら  $a = 10$ 、 $N > 40$  なら  $a = 250$

変更した理由については、検出する星や Gaia カタログから検出する星が多すぎると勾配法で位置を微調整する際に  $S$  の局所解に陥りやすいため、数を減らすことで局所解が減り成功しやすくなること、逆に検出する星が少なすぎるとそもそもサンプルが少なく解が見つけられないこと、および  $\eta$  が小さすぎると初期状態が局所解と近い際に局所解から抜け出せなくなることがある。

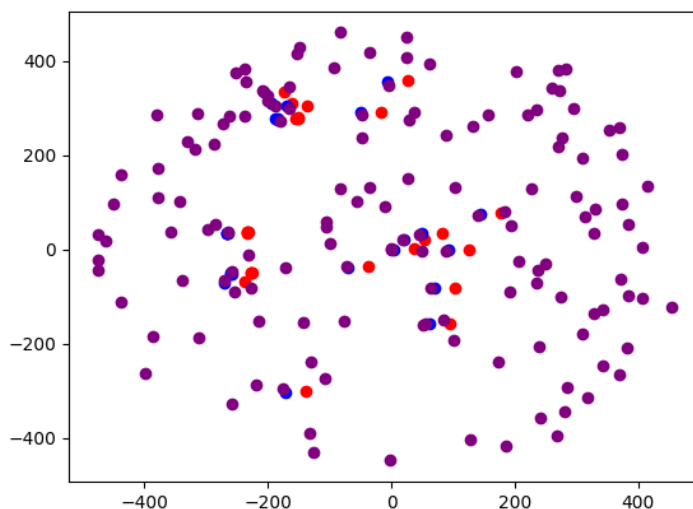


図24 図22と同じ観測データを修正したプログラムで解析した結果(各点の意味は図16と同様)

改良したパラメータを用いて図22と同じ画像から星検出を行うと図24のようになった。画像から検出した星の数と Gaia カタログから検出した星の数については適正な範囲になり、この結果からは目的天体は正しく同定された。

同じプログラムを使って表4のデータの一部から星検出を行うと表6の結果になった。

表 6 自動観測を行った天体および観測日時と観測結果 (改良後)

日付	時間 (世界標準時)	天体名	データ番号	成功/失敗
12/2	11:05:09	SS Cyg	HP0289762-HP0289765	成功
	11:16:44	BL Lac	HP0289766-HP0289769	成功
	11:27:52	V1405Cas	HP0289770-HP0289773	成功
	11:40:22	Z Cam	HP0289774-HP0289777	成功
	13:16:56	GD71	HP0289784-HP0289787	成功
	13:36:24	Feige25	HP0289789-HP0289792	成功
	13:44:51	HILT600	HP0289793	成功
	13:49:07	Feige11	HP0289794-HP0289797	成功
	13:57:29	G191-B2B	HP0289798-HP0289801	成功
	14:06:08	Hilt102	HP0289802-HP0289805	成功
	14:14:12	PG0205+134	HP0289806-HP0289809	成功
	14:22:03	PG0823+546	HP0289810-HP0289813	成功
	14:29:46	BD+75d325	HP0289814-HP0289817	成功
	14:39:24	Feige15	HP0289818-HP0289821	成功
	14:48:32	BD+08d2015	HP0289822-HP0289825	成功
	14:56:12	PG0934+554	HP0289826-HP0289829	成功
12/6	14:26:53	Feige11	HP0289985-h0289988	成功
	14:46:52	V1405Cas	HP0289989-HP0289992	成功
	14:55:38	Feige15	HP0289993-HP0289996	成功
	15:03:04	HILT600	HP0289997	失敗
	15:07:27	GD71	HP0289998-HP0290001	成功

なお、表 4 の「成功」「失敗」は自動観測によるスペクトル画像取得の成否を示すが、表 6 の「成功」「失敗」は画像の再解析による目的天体の同定の成否を示している。表 4 では 3 件失敗していたが、うち 2 件で目的天体の同定に成功し、またもともと成功していたデータでも、変更後のパラメータで引き続き成功することを確認した。その結果、表 6 内で成功率は 92% となった。

### 3.3 波長較正における改良

波長較正では、およそ 90% のスペクトルの波長較正に失敗していた。その原因として、従来使用していた夜光のスペクトルのテンプレートは夏に撮影したものであり、冬に撮影した今回の画像ではスペクトルの特徴が変わっていることが考えられる。そこで、今回の研究で得た画像からテンプレートを作り直した。

新たなテンプレートは 2022 年 12 月 13 日に撮影した HP0290233 (観測天体は Z Cam) を用いて、2.2.3 節の夜光輝線を使う方法でピクセル座標と波長を対応付け、その後、テンプレートを作成した。図 26 は、この画像における、ピクセル座標と波長の関係を表している。図中の点は表 7 に示した夜光輝線のピクセル座標と波長のデータである。このデータに直線を当てはめ、その残差にガウス過程回帰して得られたモデルが実線で表されている。このモデルによって、ピクセル座標を波長に変換する。

図 26 によってピクセル座標と波長が対応づけられた画像 HP0290233 に対して、旧テンプレートと同じ、

特徴的な夜光輝線が多い波長域を選んで、新たなテンプレートを作成した。図 25 に新旧のテンプレートを示す。夜光輝線の強度比が新旧間で有意に異なる輝線が存在することがわかる。

本研究で扱う自動解析システムでは、波長 ( $\lambda$ ) - ピクセル座標 ( $y$ ) の関係を  $\lambda = f(y) + b$  としたとき、 $f(y)$ 、つまり、図 26 の実線は変化せず、 $b$  が観測ごとに数ピクセル (= 1 nm) 程度変化すると仮定している。テンプレートがスペクトルに適合する箇所を搜索することで、 $b$  を決定し、観測スペクトルのピクセル座標を波長に変換する。従来は図 17 のように、テンプレートに合致する位置をスペクトル全域にわたって搜索し、相関係数を計算していた。しかし、テンプレートからのずれは数ピクセルと小さく、全域にわたって搜索する必要はない。例えば、図 27 はあるデータに対して旧テンプレートを用いた相関関数である。本来はピクセル座標 = 600 付近でテンプレートと合致し、最も高い相関係数が得られるはずだが、それ以外の場所でより相関係数が偶然、高くなっている。このような場合、従来の全域の中で最も相関係数が高い地点に決める方法では、自動解析の波長較正が失敗する。したがって、搜索範囲をテンプレートの前後  $\pm 10$  ピクセルに絞り、より適する結果が出るよう処理を改良した。その結果、すべての観測スペクトルに対して図 28 のような適切な自動波長較正を行うことができた。

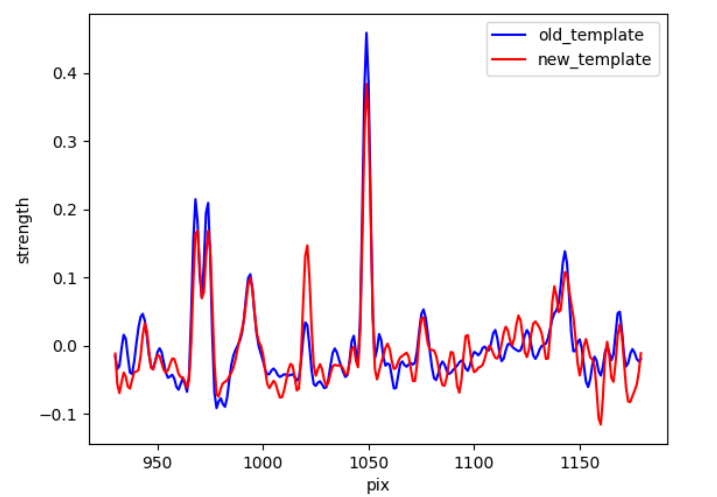


図 25 新旧テンプレートの比較

表 7 夜光輝線のピクセル座標と波長の対応

ピクセル座標	波長 (nm)
1332.0	435.6
1049.0	546.1
973.5	577.0
845.0	630.0
622.0	724.0
510.0	771.5
361.0	834.5

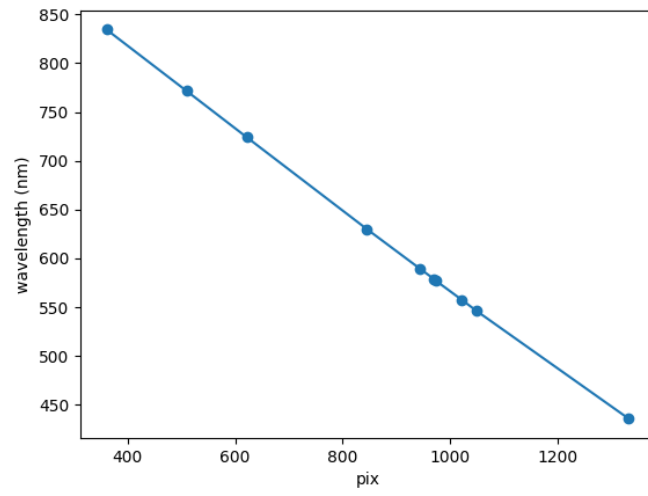


図 26 ピクセル座標と波長の対応関係 (点) と、それをもとしたモデル (線)

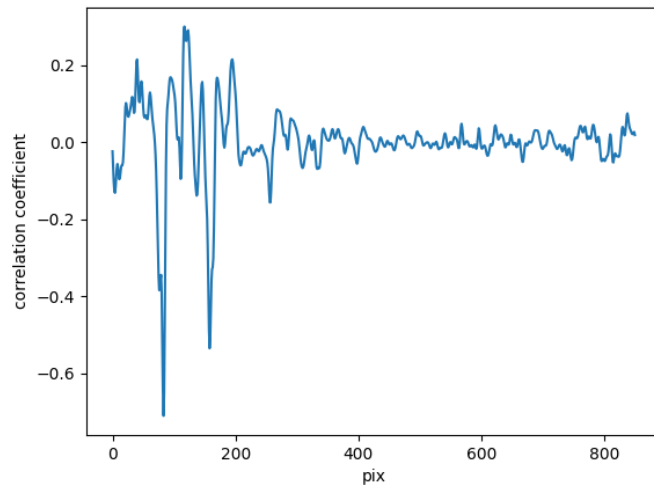


図 27 波長較正でのスペクトルとテンプレートの相関係数のグラフ

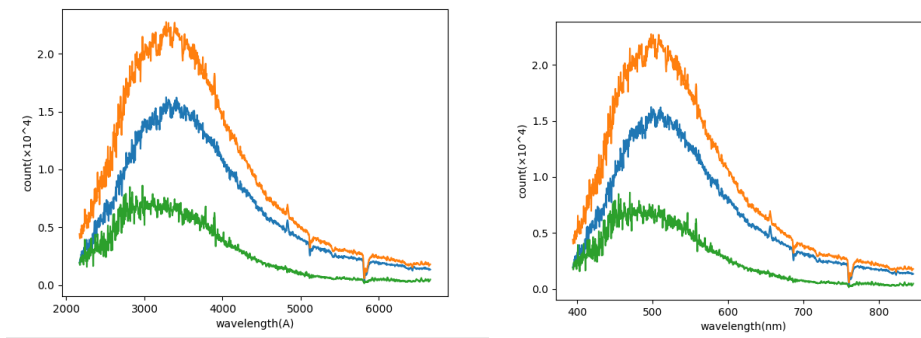


図 28 図 14 のスペクトルを波長較正したもの。左は従来のシステムで (失敗)、右は改良したシステムで行った (成功)

## 4 考察

### 4.1 新星・矮新星のスペクトル分析

この節では、今回の自動観測によって取得に成功した画像データと、前章で述べた改良を施した自動解析によって得られたスペクトルのうち、新星および矮新星のスペクトルについて天体ごとに考察を行う。

#### 4.1.1 古典新星 V1405 Cas

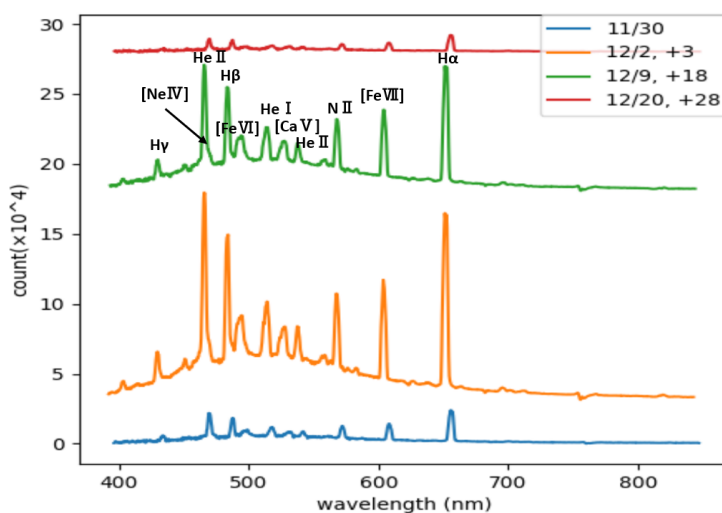


図 29 今回の自動観測で取得した V1405 Cas のスペクトル

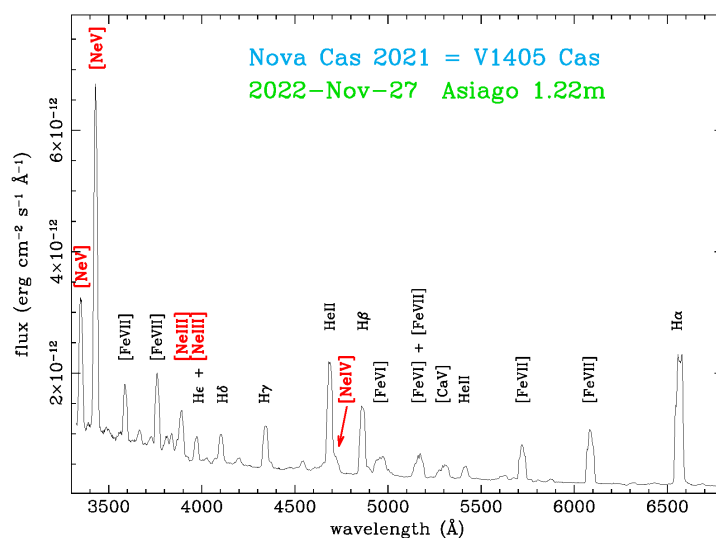


図 30 2022 年 11 月 27 日の V1405 Cas のスペクトル [10]

図 29 は今回撮影した V1405 Cas のスペクトルである。水素のパルマー系列をはじめとする複数の輝線が共通で見られる。しかし、12/2 と 12/9 のデータにおける輝線の波長が、11/30 と 12/20 の波長と、約 4nm ずれていることがわかった。V1405 Cas は新星爆発から 1 年以上経過しており、数日から数週間程度でこのようなスペクトルの変化は考えづらい。したがって、ここでの波長較正はやや失敗している可能性が高いため、さらなる見直しが必要である。

また、輝線強度を、輝線のピークカウントとその近くの連続光のカウントの比で測ると、例えば H $\alpha$  線は 11/30 から 12/9 まで約 12 倍でほぼ一定であり、大きな変化は見られない。これは爆発から 1 年以上経過した新星としては自然に理解できる挙動であり、自動解析の結果が適正であることを示す。ただし、12/20 のみ 15 倍程度まで増光しているのがみられた。一方、このデータでは連続光や輝線のカウントが低く、輝線強度の誤差が大きい可能性がある。

さらに、図 30 によると 2022 年 11 月の V1405 Cas は [NeV](334.6nm,342.7nm) の禁制線が強く出ており [10]、同時期に取得した図 29 にも [NeIV](472nm) の輝線がわずかに見えていることが確認できる。白色矮星は通常、ヘリウムの核融合によって生成された炭素、窒素、酸素で構成される。一方、元の恒星の質量が大きい場合は、さらに核融合が進み、酸素、ネオン、マグネシウムを主成分とする白色矮星が形成されると考えられている。新星爆発中にネオンの輝線が検出されることは、白色矮星がそのようなより質量の大きい恒星から形成された、重い白色矮星であることを示唆すると考えられている。したがって、V1405 Cas もそのような重い白色矮星を含む新星であると考えられる。

#### 4.1.2 矮新星 SS Cyg

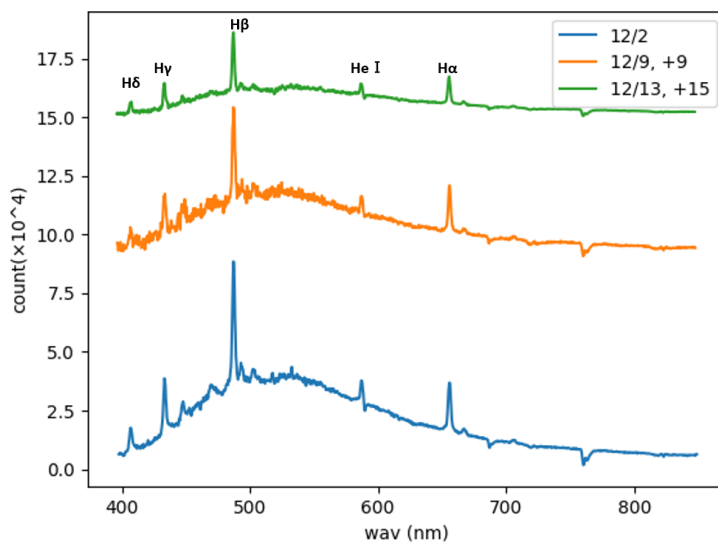


図 31 SS Cyg のスペクトル



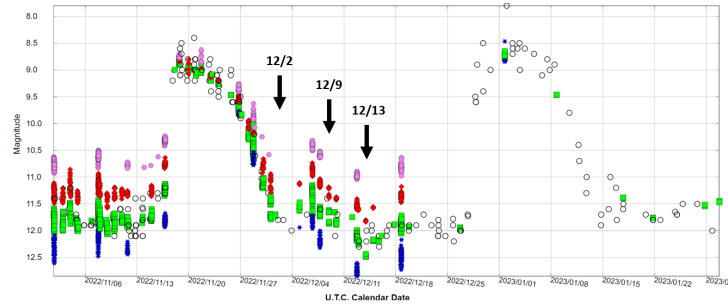


図 32 2022 年 11 月から 2023 年 1 月にかけての SS Cyg の光度変化。図中の白丸は眼視観測による測定値、青、緑、赤、マゼンタの点はそれぞれ CCD で測定した B, V, R, I バンド等級を示す。<sup>\*4</sup>

図 31 は SS Cyg のスペクトルである。こちら水素のパルマー系列をはじめとする輝線が共通で見られた。なお、連続光と輝線とのカウント比を調べたところ、例えば H $\alpha$  線はピーク値が連続光の 2.1 倍 (12/2)、2.7 倍 (12/9)、2.9 倍 (12/13) と、全体的に日を追うごとに強くなっていった。

また、図 32 は SS Cyg の 2022 年 11 月から 2023 年 1 月の光度曲線であり、図中の矢印はスペクトルを取得した時刻を表す。この図から、観測を行った 2022 年 11 月から 12 月にかけて、SS Cyg はアウトバーストの極大を過ぎ、静穏時へ戻る緩やかな減光期だったことがわかる。輝線は矮新星において静穏時の円盤から出ており、増光を起こすアウトバースト中は降着円盤が光学的に厚くなって逆に吸収線が出ることもあるため、これはちょうどアウトバーストが終了し、輝線を放つガスが降着円盤中にため込みだしたと解釈できる。

#### 4.1.3 矮新星 Z Cam

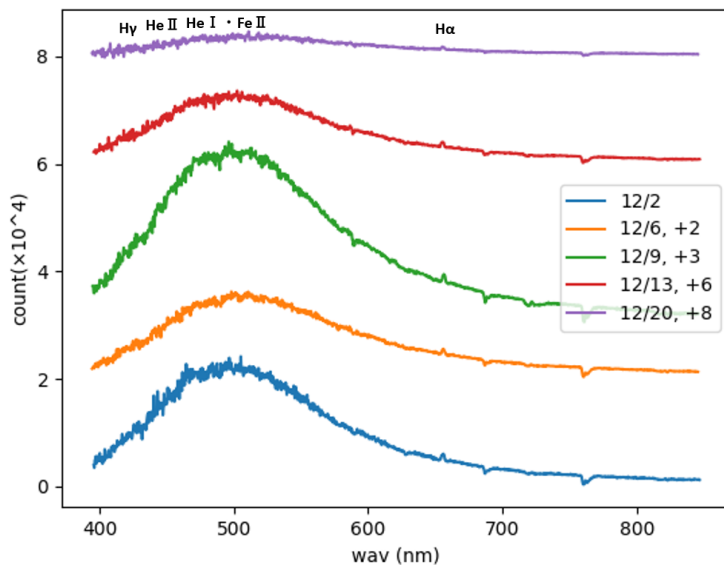


図 33 Z Cam のスペクトル

<sup>\*4</sup> <https://www.aavso.org/>

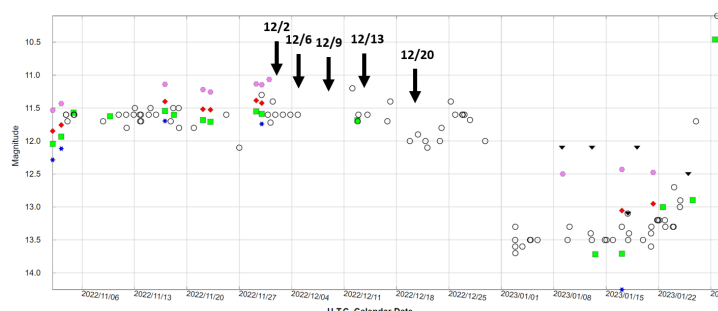


図 34 2022 年 11 月から 2023 年 1 月にかけての Z Cam の光度変化。図中の白丸は眼視観測による測定値、青、緑、赤、マゼンタの点はそれぞれ CCD で測定した B, V, R, I バンド等級を示す。<sup>\*5</sup>

図 33 は、今回撮影した Z Cam のスペクトルである。連続光成分が強く輝線が目立たないが、かろうじて水素のパルマー系列の輝線は確認できた。輝線の連続光に対するカウント比については、例えば H  $\alpha$  線はおおむね 1.2-1.4 倍程度で安定しており、大規模な変化は見られない。

また、図 34 は Z Cam の 2022 年 11 月から 2023 年 1 月の光度曲線であり、図中の矢印はスペクトルを取得した時刻を表す。この図から、観測を行った 2022 年 11 月から 12 月にかけて、Z Cam は静穏状態とアウトバースト状態の中間の「スタンドスティル」と呼ばれる状態にあったことがわかる。この状態は Z Cam 型の矮新星でよくみられる特徴的なふるまいであり、この間は光度がほぼ一定で円盤の状態も変わっていないことから、大規模な変化が見られないことは理解できる。さらに、輝線が弱いことから円盤が光学的に厚い状態が続いていることが示唆される。

## 4.2 天体の同定

はじめの V バンドで撮影したフラット画像によるフラット補正を施した画像から星検出を行っていたものよりは、フラット補正を行わない現在の方式のほうが成功率が高いため、おおむね改良は成功したといえる。しかし、フラット補正を行わない画像は図 12 右の画像のように全体が均等な感度で観測されていないため、特に画像の継ぎ目のムラにより星検出に影響を及ぼすことが考えられる。したがって、理想的には系統誤差が小さい、より正確なフラット画像を取得し、それをを用いて補正するのが望ましい。そこで、12 月 21 日の明け方にバンド無しのスカイフラットを撮影しそれでフラット補正を行った。スカイフラットとは、薄明時の空を一様光源と仮定して撮像することでフラット画像を得る方法である。かなた望遠鏡では通常、ドーム内に設置されたスクリーンを照明で照らすことによって一様光源を作り、そのスクリーンを撮像することでフラット画像を得るドームフラットが用いられている。しかし、照明の向きや強度が理想的でない場合、スクリーンが一様な光源にならず、フラット画像に系統誤差が生じることもある。取得したスカイフラットで補正した結果、図 35 右のような画像が得られ、左の Vband でのフラットより偏りが少ない画像となった。よって、画面下部で偽の星を検出しにくくなり、目的天体の同定が成功したため、今後の観測ではスカイフラット入りの処理を行ったほうがより良い結果が得られると考えられる。

表 6 に示されるように、改良したシステムでも 12/6 に取得した HILT600 については目的天体の同定に失敗している。この天体は銀河面に近く、多くの星が検出されるため、目的天体を別の星に誤同定されやすいと

<sup>\*5</sup> <https://www.aavso.org/>

考えられる。今後は、星が多い領域でも安定して目的天体の同定に成功するよう、アルゴリズムの見直しを検討する。

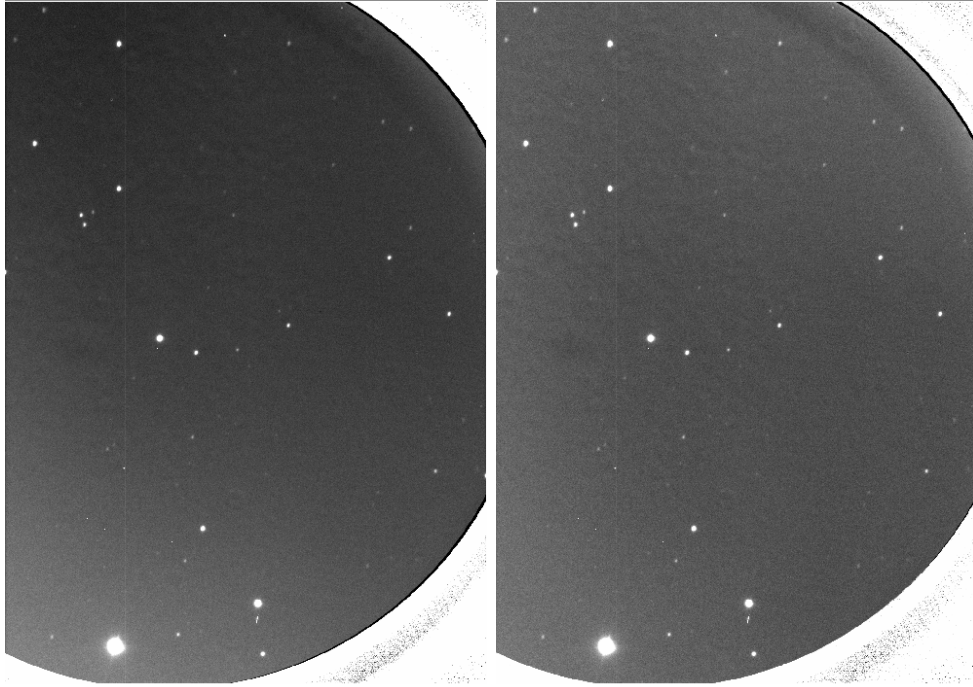


図 35 12/6 の Z Cam の観測画像をフラット補正したもの。Vband のフラット画像によるもの (左) と、バンド無しのスカイフラット画像によるもの (右)

### 4.3 自動解析

波長較正はテンプレートの作り直し、検索範囲の適正化により適正な波長較正が行えるようになった。だが、1つのテンプレートのみで自動解析を運用することは、観測環境の変化によっては不適切である可能性もあるため、その点については考慮が必要かもしれない。今後は、季節ごとのテンプレートを用意して使用するテンプレートを変更する、もしくは季節ごとのテンプレートを平均して精度を上げたものを使用する、一つのテンプレートで波長較正に失敗した場合は別のテンプレートを用いるなどの改良が考えられる。

また、4.1.1 で述べたように、V1405 Cas の波長較正に数 nm 程度の誤りが見られた。今後は、ピクセル座標と波長の対応関係  $f(\lambda)$  の安定性の調査など、この誤差が生じた原因を解明し、自動解析システムを改良する必要がある。

## 5 総括と展望

新星や矮新星などの激変星にはその初期に不明な点が多く、早期に観測を行うことが重要である。しかし天体が発見された当初はその天体の型が分からないため、観測手法を決め、観測をはじめるとするには専門家の立ち合いが不可欠であった。観測機会を増加させるため、これらの判断をプログラムが行うことで専門家の介入を不要とするために自動観測システム Smart Kanata の開発が行われている。

本研究では、Smart Kanata に搭載される予定の自動分光観測システムの性能評価を行い、発生した問題の解決とシステムの確立を目指した。そのため、2022 年 11 月から 12 月にかけて、新星や矮新星、分光標準星を観測・解析してシステムの試験運用を行い、その問題点を洗い出して対処を行った。

本研究で明らかになったことを整理する。まず、Smart Kanata に組み込む予定の自動分光観測については、V バンドによるフラット補正を行わずに星検出を行うことで、成功率を大幅に改善することができた。しかし、一部の天体ではカタログや画像から検出する星の数が多すぎて、勾配法で局所解に陥る、あるいは星の数が少なすぎて、目的天体の同定に失敗していたので、視野内の星の数が 5 から 40 になるよう検出する星の閾値を調整する処理を追加するなどして、より高い成功率で同定が行えるようになった。また、波長較正についてははじめ数千 Å の誤差がみられるなどの問題がみられたものの、夜光スペクトルのテンプレートの再作成および、観測スペクトルにテンプレートが合致する位置の搜索範囲の最適化によって、今回取得したすべての観測データで正確に波長較正を行えるようになった。

今後は、成功率をさらに高められるよう改善策を検討しつつ、現在開発中のため独立したシステムとなっている自動分光観測プログラムを Smart Kanata に取り込み、実際に突発天体の観測を行うことで、新星の爆発直後の状態などの研究を可能にする。

## 6 付録 激変星以外のスペクトル

4.1 節に記載していない、本研究で取得したスペクトルを示す。図 37 の BL Lac(活動銀河核、ブレイザー) 以外はすべて分光標準星である。

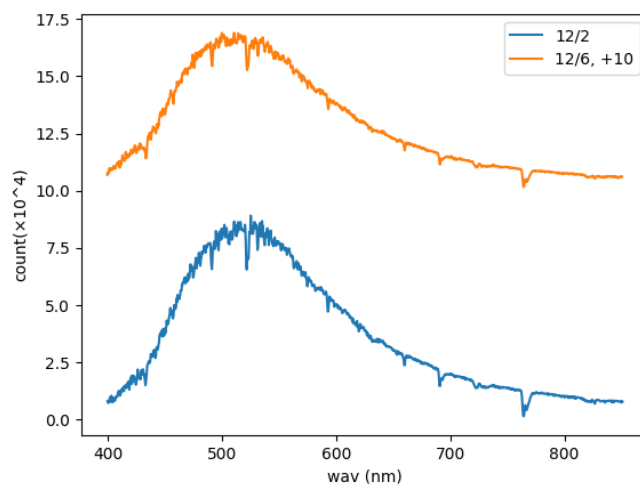


図 36 BD+08d2015

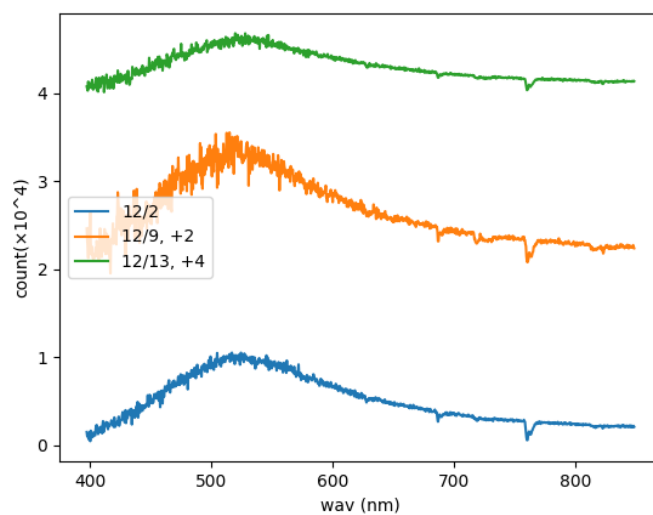


図 37 BL Lac

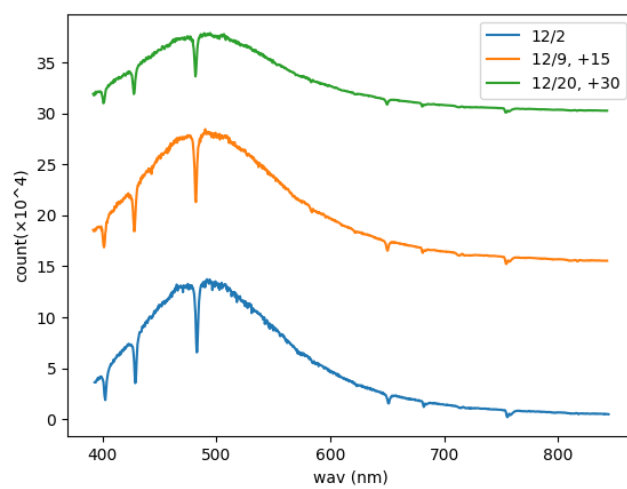


图 38 Feige15

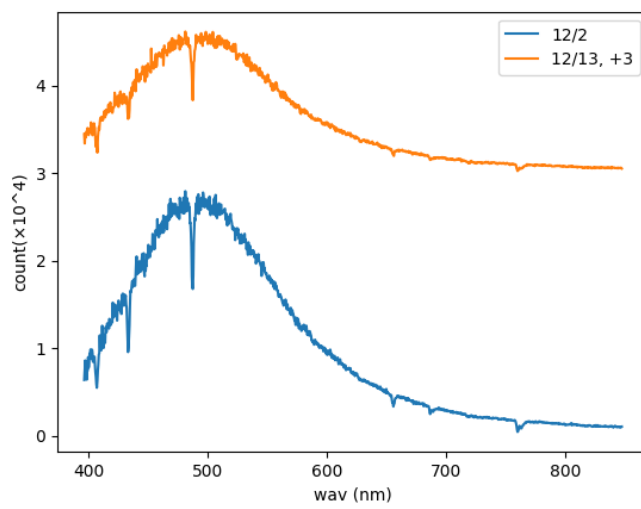


图 39 Feige25

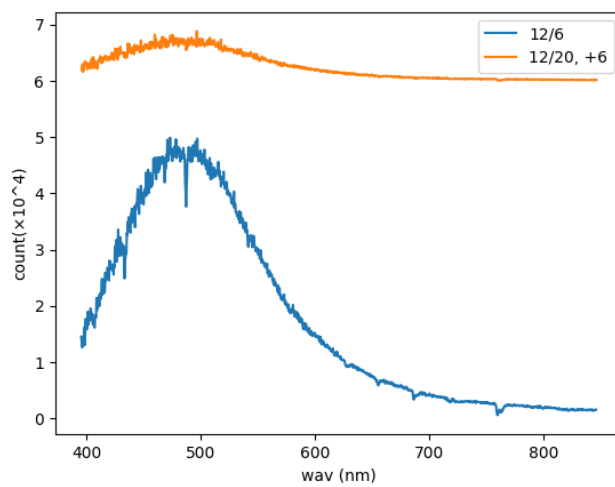


图 40 Feige34

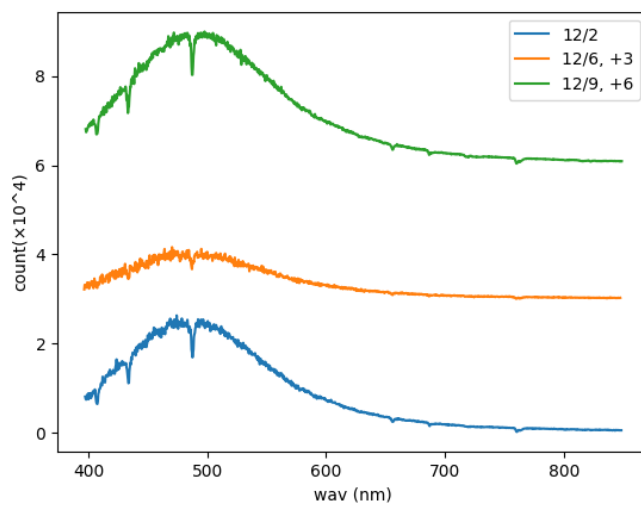


图 41 Feige11

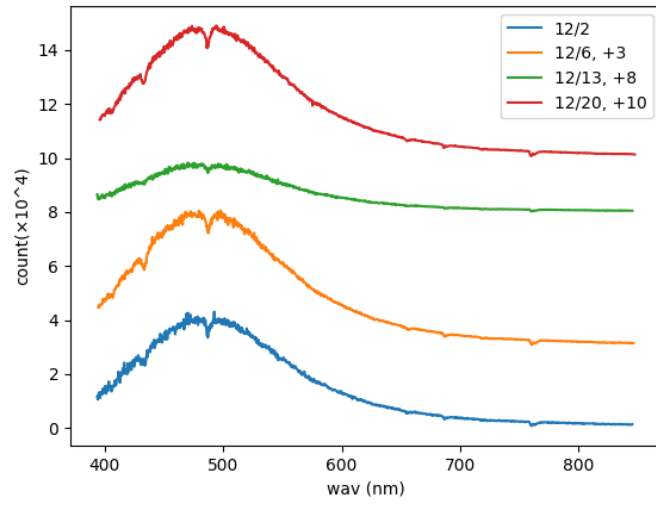


图 42 G191-B2B

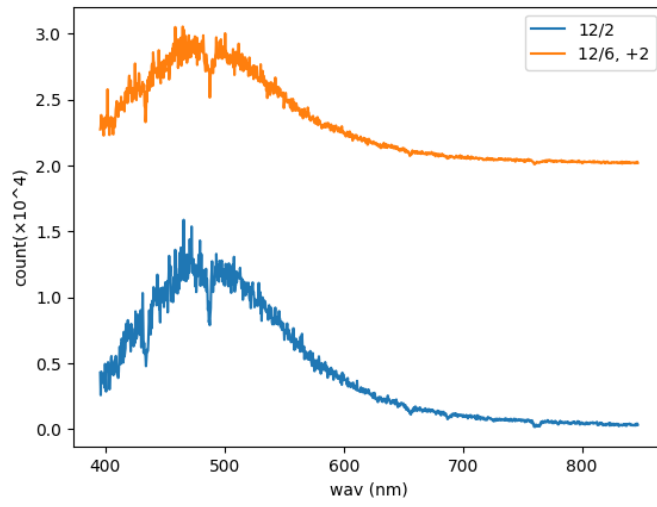


图 43 GD71



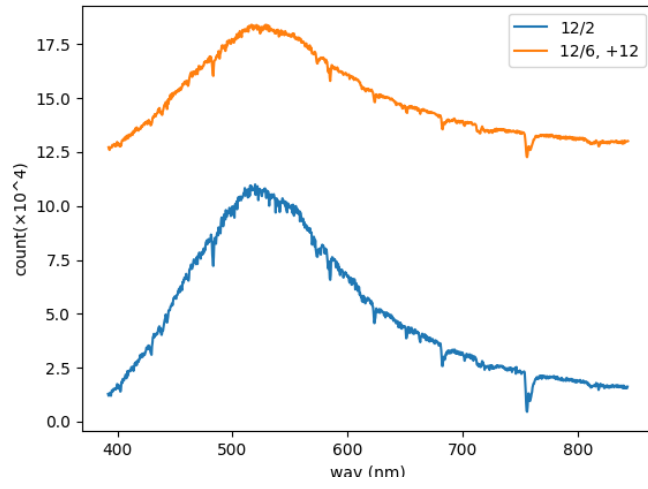


图 44 Hilt102

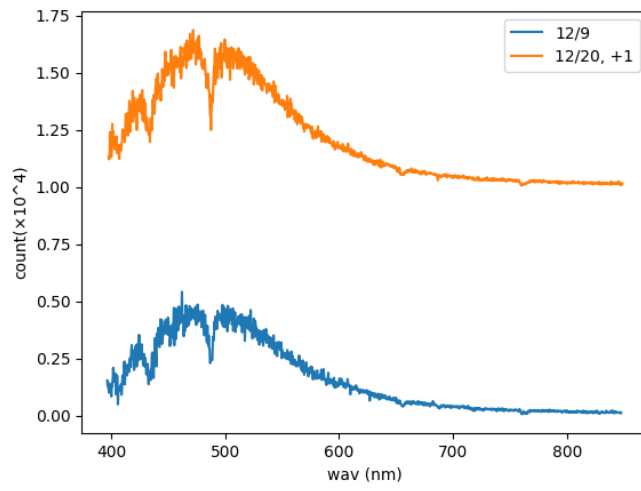
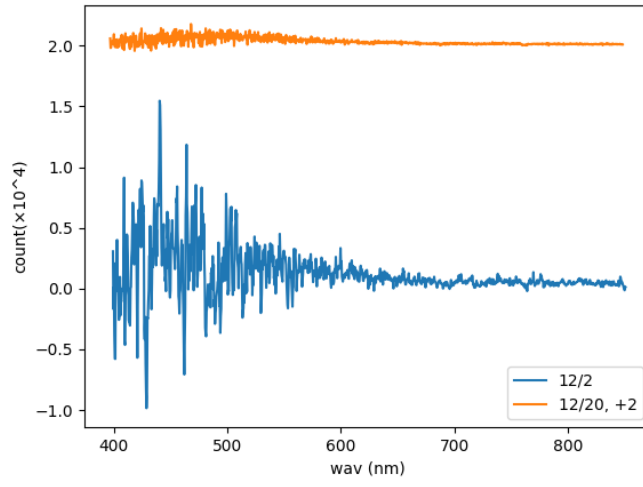
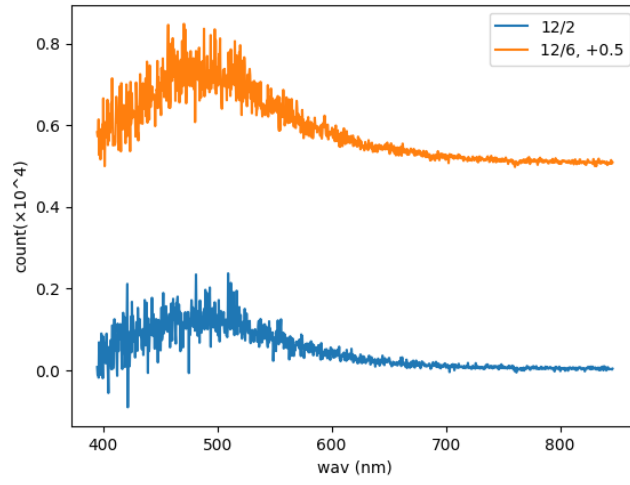


图 45 HZ2



☒ 46 PG0205+134



☒ 47 PG0823+546

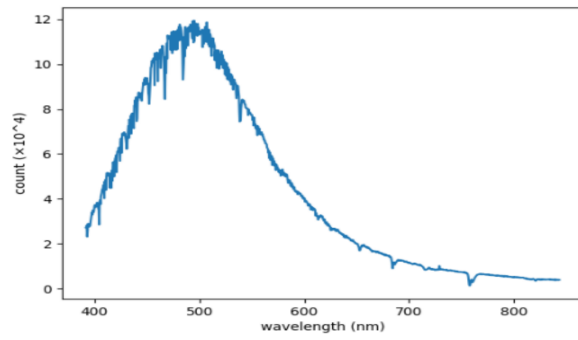


图 48 BD+75d325

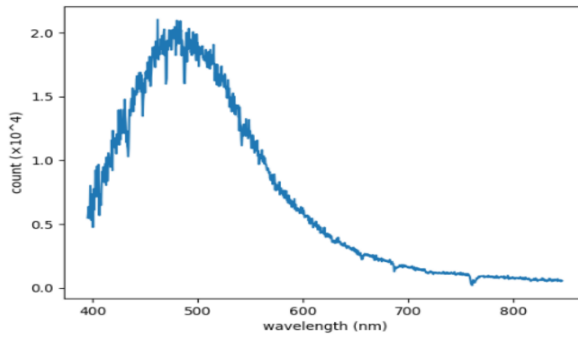


图 49 PG0934+554

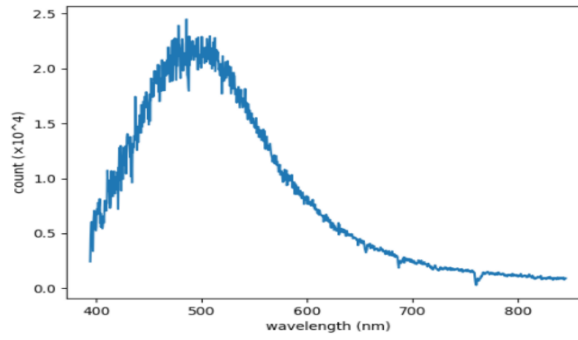


图 50 AGK+81d266

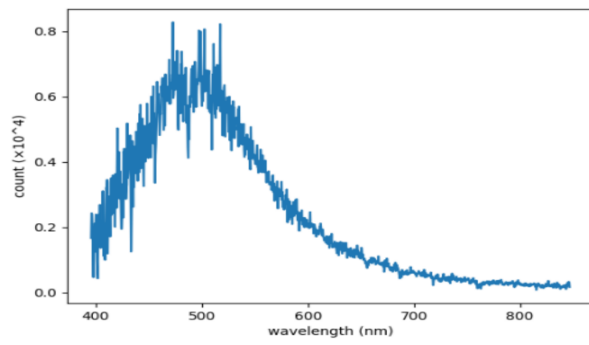


图 51 PG0918+029

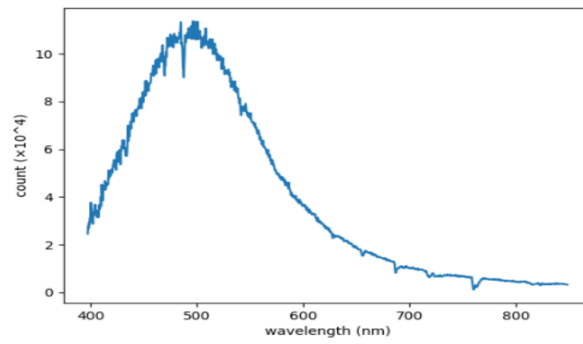


图 52 BD+28d4211

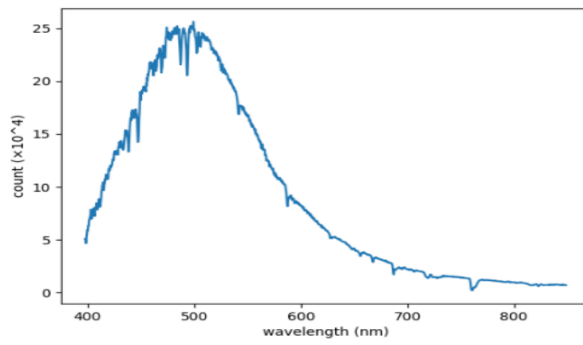


图 53 BD+25d4655

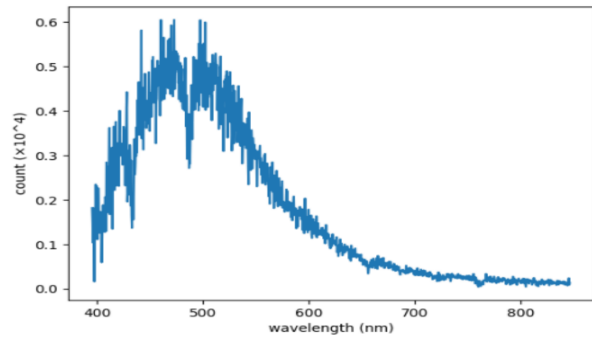


图 54 HZ14

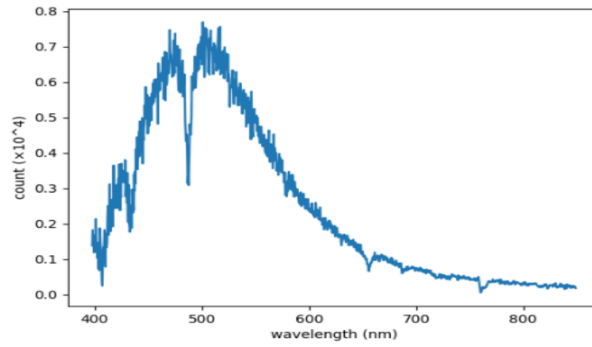


图 55 G93-48

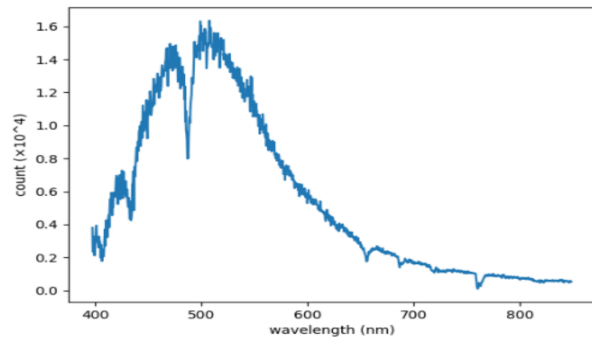


图 56 Wolf1346

## 7 参考文献

- [1] Warner, B., Cataclysmic variable stars, Camb. Astrophys. Ser., 28, 1995
- [2] Della Valle, M. & Izzo, L., The Astronomy and Astrophysics Review, 28, 3, 2020
- [3] 今村和義, 新星の光度変化, <http://www5f.biglobe.ne.jp/~hosizora/de/novalightcurve.htm>
- [4] 田口, 他, 2020, せいめいユーザーズミーティング <http://seimei.nao.ac.jp/files/UM/2020/Oral/Taguchi.pdf>
- [5] Arai, A., Isogai, M., Yamanaka, M., Akitaya, H., & Uemura, M., Acta Polytechnica CTU proceedings, Vol. 2, 257, 2015
- [6] 古賀柚希, 情報理論的な自動意思決定システムによる突発天体现象の研究, 広島大学卒業論文, 2020
- [7] 佐崎凌佑, かなた望遠鏡を用いた自動観測による激変星の増光初期の研究, 広島大学卒業論文, 2021
- [8] 泉拓磨, 基礎天文学観測レポート 小望遠鏡による観測実習, [http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/jisshu2010/report/2010\\_report\\_izumi.pdf](http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kmotohara/30cm/jisshu2010/report/2010_report_izumi.pdf)
- [9] 河原直貴, かなた望遠鏡によるカルシウム超過トランジェント iPTF15eqv の観測的研究, 広島大学修士論文, 2018
- [10] Munari, U. & Valisa, P., The Astronomer' s Telegram 15796, 2022