

2023年度 卒業論文

多色撮像観測によるIW And型矮新星の研究

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

B200723 笠井 理香子

主査：植村 誠
副査：岡本 宏己

2024年4月2日

概要

矮新星は激変星の一種であり、降着円盤の物理を研究するための天然の実験場として注目されてきた。IW And 型矮新星には静穏時とアウトバースト時の中間程度の状態で光度が周期的に変動した後、再増光するといった他の矮新星にはない特徴がみられる。この特徴はこれまでの降着円盤の理論モデルのみでは説明することができない。本研究では天体の色変化から IW And 型矮新星に見られる特徴を調べることを目的として広島大学かなた望遠鏡を用いた IW And 型矮新星 KIC9406652 と IM Eri の多色撮像観測を行った。

観測の結果、KIC9406652 では観測期間中に期待されていた IW And 型特有の中間状態（図 1）が観測された。また、色指数から通常の色変化とは異なった天体が明るくなると同時に色が赤くなるといった現象が確認され、IW And 型矮新星に特徴的な状態の色変化の観測に成功した。

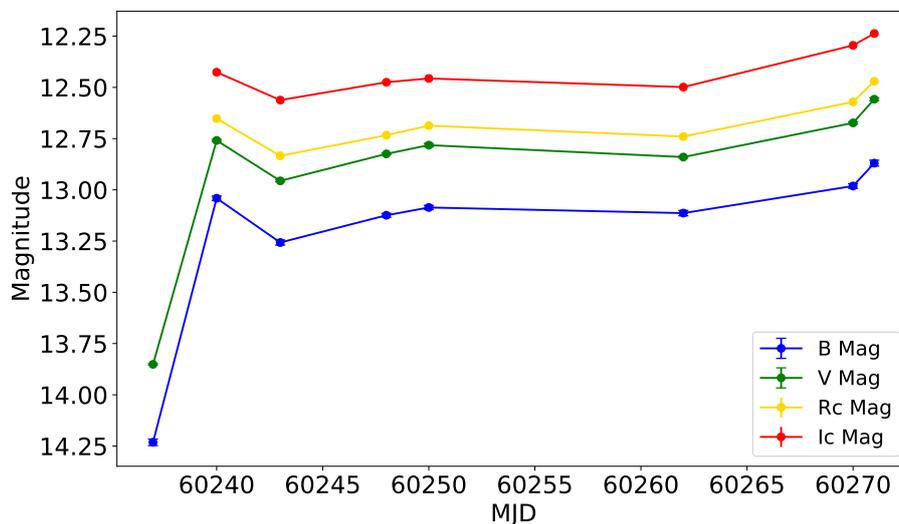


図 1: KIC9406652 の光度曲線

目次

第 1 章	序論	1
1.1	矮新星	1
1.1.1	円盤不安定モデル	2
1.1.2	Z Cam 型矮新星	2
1.1.3	IW And 型矮新星	3
1.2	研究目的	4
第 2 章	観測	5
2.1	対象天体の選定	5
2.2	観測	5
2.2.1	かなた望遠鏡	6
2.2.2	HONIR	7
2.3	データ解析	8
2.3.1	一次処理	8
2.3.2	測光	9
第 3 章	結果	11
3.1	KIC 9406652	11
3.1.1	光度曲線	11
3.1.2	色指数	12
3.1.3	色等級図	13
3.1.4	可視光-近赤外線フラックス分布	13
3.2	IM Eri	18
3.2.1	光度曲線	18
3.2.2	色指数	19
3.2.3	色等級図	20
3.2.4	可視光-近赤外線フラックス分布	21
第 4 章	考察	26
4.1	円盤不安定モデルによる観測結果の解釈	26
第 5 章	まとめと今後	28

目次

1	KIC9406652 の光度曲線	1
1.1	SS Cyg の光度曲線 (ASAS-SN)	1
1.2	矮新星の降着円盤の熱平衡曲線及び円盤の進化 (嶺重慎 [1987])	2
1.3	Z Cam の光度曲線 (ASAS-SN)	3
1.4	IW And の光度曲線 (Kato [2019])	4
2.1	かなた望遠鏡	7
2.2	生画像 (左) とバイアス補正処理後の画像 (右)	9
2.3	開口測光のイメージ図 (Akihiko [2006])	10
3.1	KIC 9406652 の可視側 (V バンド、左) と近赤外側 (J バンド、右) の光度曲線	11
3.2	KIC 9406652 の可視側 (左) と近赤外側 (右) の多バンド光度曲線	12
3.3	KIC 9406652 の色指数 $B-V$ (左) と $B-R_c$ 、 $B-I_c$ (右) の時間変化	12
3.4	KIC 9406652 の横軸 $B-V$ 、縦軸 V 等級の色等級図	13
3.5	MJD 60243 (上)、MJD 60271 (下) の可視光-近赤外線フラックス分布	14
3.6	黒体放射モデルと MJD 60240 のフラックス分布	15
3.7	MJD 60271 の a_1 (左上)、 T_1 (右上)、 a_2 (左下)、 T_2 (右下) のトレースプロット	16
3.8	MJD 60271 のコーナープロット	17
3.9	MJD 60271 のフラックス分布と最適化モデル	17
3.10	KIC 9406652 の温度変化	18
3.11	IM Eri の可視側 (V バンド、左) と近赤外側 (J バンド、右) の光度曲線	18
3.12	IM Eri の可視側 (左) と近赤外側 (右) の多バンド光度曲線	19
3.13	IM Eri の色指数 $B-V$ (左) と $B-R_c$ 、 $B-I_c$ (右) の時間変化	19
3.14	IM Eri の色指数 R_c-I_c の時間変化	20
3.15	IM Eri の横軸 $B-V$ 、縦軸 V 等級の色等級図	20
3.16	IM Eri の横軸 R_c-I_c 、縦軸 R_c 等級の色等級図	21
3.17	MJD 60240 (上)、MJD 60262 (下) の可視光-近赤外線フラックス分布	22
3.18	黒体放射モデルと MJD 60267 のフラックス分布	22
3.19	MJD 60262 の a_1 (左上)、 T_1 (右上)、 a_2 (左下)、 T_2 (右下) のトレースプロット	23
3.20	MJD 60262 のコーナープロット	24
3.21	MJD 60262 のフラックス分布と最適化モデル	24
3.22	IMEri の温度変化	25

4.1	ASAS-SN で作成した KIC 9406652 (左) と IM Eri (右) の光度曲線 (ASAS-SN)	26
4.2	傾いた降着円盤の時間発展。グラフは上から順に円盤の光度、V 等級、半径、総質量、全角運動量、正規化された歳差運動 (Kimura et al. [2020a])	27

第1章 序論

1.1 矮新星

矮新星は白色矮星（主星）とロッシュローブを満たす晩期型主系列星（伴星）から成る近接連星系である。伴星表面のガスは主星の重力にひかれてラグランジュ点を通過して主星に流れこみ、降着円盤を形成する。降着円盤は惑星や恒星、銀河の形成にも関わる宇宙の重要な基本構成要素の一つである。矮新星は降着円盤からの放射が近赤外領域から可視、紫外線領域まで卓越していること、また数分から数十日という観測しやすい時間スケールで変動することから降着円盤の活動を研究するための天然の実験場として注目されてきた。矮新星は静穏時から 2-5 等程度の増光を 10 日から数百日程度の間隔で繰り返す。この増光現象はアウトバーストと呼ばれ、降着円盤の状態変化によって引き起こされる。代表的な矮新星 SS Cyg の光度曲線を図 1.1 に示す。横軸は修正ユリウス日（Modified Julian Date;MJD）、縦軸は g 等級である。MJD とはユリウス暦紀元前 4713 年 1 月 1 日正午から数えた日数を示すユリウス通日（Julian Day;JD）から 2400000.5 を引いたものである。12 等程度の静穏期とそこから 9 等程度までの増光が交互に見られ、アウトバーストが繰り返されていることがわかる。

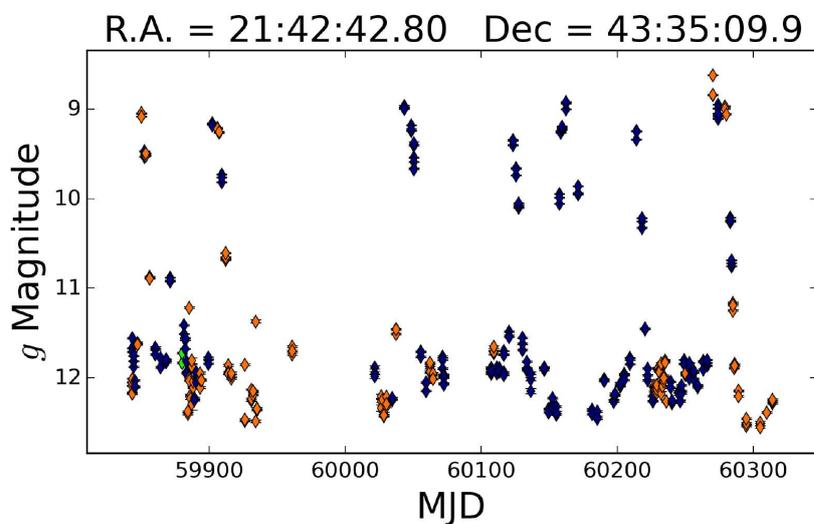


図 1.1: SS Cyg の光度曲線 (ASAS-SN)

1.1.1 円盤不安定モデル

矮新星の光度変動は円盤不安定モデルで説明される。降着円盤には中性水素ガスで構成された粘性の小さい低温状態と電離水素ガスで構成された粘性が大きい高温状態が存在する。降着円盤はこの2つの安定した状態を不連続に振動しており、熱的不安定性とよばれる。降着円盤の状態変化は図 1.2 の熱平衡曲線で説明できる。横軸は降着円盤の表面密度、縦軸は表面温度である。この図では低温状態 AB と高温状態 CD が安定して存在し、その中間の状態は不安定で現実には存在しえない状態である。円盤が低温状態 A にある時、伴星から流れ込むガスは円盤にたまり続け表面密度は時間とともに増加する。しかし臨界状態 B まで表面密度が増加すると降着円盤は熱平衡状態を脱して高温状態 D に遷移する。この時ガスは粘性の増加により角運動量を失い、同時に重力エネルギーを解放することで円盤は急激に明るく光るようになる。この急激に明るく光る現象が光度曲線でアウトバーストとしてみえる。その後円盤内のガスの量は減少していき C 点で不安定性により円盤は再び低温状態 A となって伴星からのガスをためる段階に入る。降着円盤に低温状態と高温状態のサイクルが存在するため矮新星は静穏期とアウトバースト期を繰り返している。

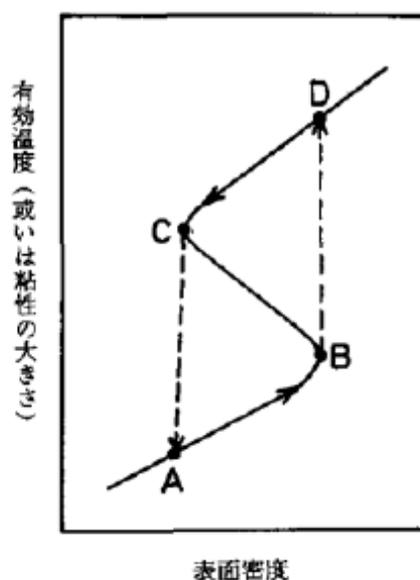


図 1.2: 矮新星の降着円盤の熱平衡曲線及び円盤の進化 (嶺重慎 [1987])

1.1.2 Z Cam 型矮新星

Z Cam 型矮新星とは矮新星のサブクラスの 1 つである。通常のアウトバースト (ノーマルアウトバースト) に加えて一定期間アウトバースト期と静穏期の中間程度の光度に留まるスタンドスティルと呼ばれる状態をもつ。伴星からの質量輸送率がある程度以上大きい場合は、降着円盤がいつも高温状態で安定してしまい、大きな明るさの変化は観測されなくなる。このような系も実際に存在し、新星状変光星と呼ばれる。Z Cam 型矮新星のスタンドスティルはこの状態と深い関係があると思われるっており、伴星からの質量輸送率の微妙な変動で、少し質量輸送率が小さい時にはノーマルアウトバーストを繰り返し、質量輸送率がやや大きな時にはスタンドスティルになるのではないかと考えられている (野本憲一 et al. [2009.7])。しかし質

量輸送率が変化する原因はまだわかっていない。Z Cam の光度曲線を図 1.3 に示す。MJD 59700 から MJD 59900 付近に見られる 12 等程度で等級が一定になっている部分がスタンドスタイルである。

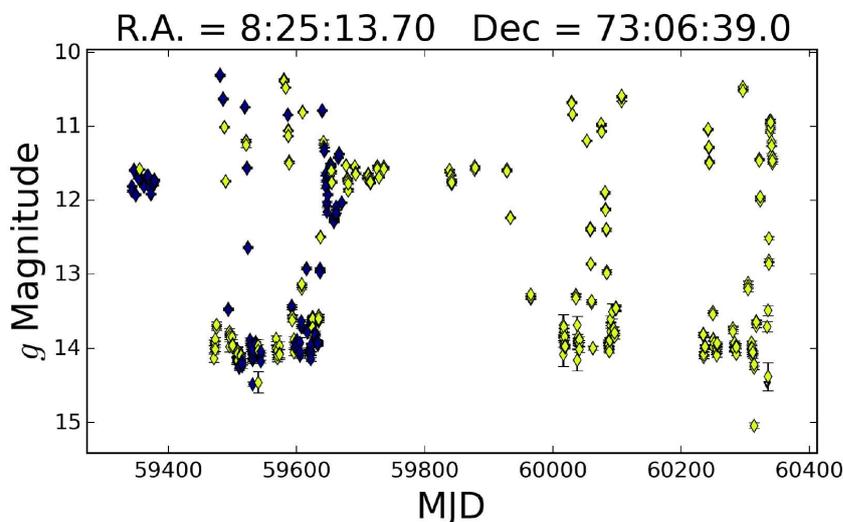


図 1.3: Z Cam の光度曲線 (ASAS-SN)

1.1.3 IW And 型矮新星

Z Cam 型矮新星のサブクラスで Z Cam 型矮新星同様にアウトバーストとスタンドスタイルを持つ一方、スタンドスタイル中の光度は一定である Z Cam 型矮新星に対し IW And 型矮新星は周期的な光度変化がみられる。また、Z Cam 型矮新星のスタンドスタイルは減光で終了するのに対し、IW And 型矮新星は増光で終了する。IW And の光度曲線を図 1.4 に示す。図よりスタンドスタイルとアウトバーストが確認できるが、図 1.3 と違いスタンドスタイル後にミニアウトバーストが起きていて尚且つ MJD 57650 から MJD 57700 にみられるようにスタンドスタイル中に 0.5 等程度の光度変化がみられる。

通常の熱的不安定性モデルでは降着円盤の状態には「静穏期」と「アウトバースト期」しか存在せず、この 2 つの時期を繰り返している。よってこのモデルでは IW And 型矮新星に見られる中間光度からの増光という挙動を説明することができない。そのため、IW And 型矮新星特有の光度変動を説明するためには熱的不安定性モデルだけでは不十分である。IW And 型矮新星が通常と異なる光度変動を起こすメカニズムにはいくつかのモデルが提唱されているものの、はっきりとしたメカニズムはまだ分かっていない。以下に現在提唱されているモデルを示す。

1. 伴星からの質量輸送率が変動するモデル

通常円盤不安定性モデルは伴星からの質量輸送率を一定とするが、Hameury and Lasota [2014] は伴星からの質量輸送率が何らかの原因により変動を起こし、それが通常と異なる光度変動の原因とするモデルを提案した。

2. 傾いた円盤モデル

Kimura et al. [2020a] は降着円盤が軌道平面に対してわずかに傾いていることが光度変動の原因とするモデルを提案した。円盤が傾いていることで伴星からのガスが円盤外側でなく主星に近い円盤内側に流れこみ、これにより円盤内側が常に高温状態となることでスタンドスティルが起こる。その後円盤外側で熱不安定性によりアウトバーストが起きるというメカニズムである。

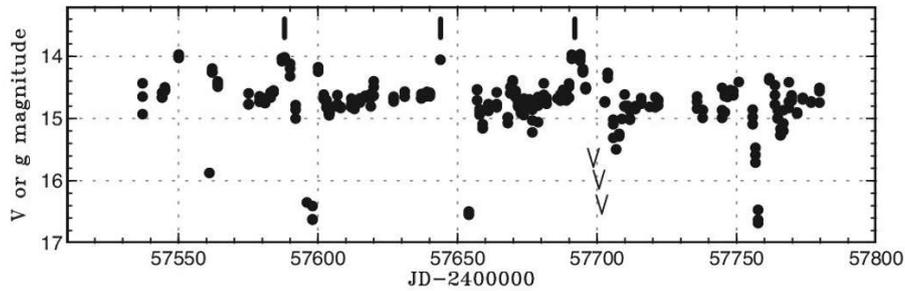


図 1.4: IW And の光度曲線 (Kato [2019])

1.2 研究目的

IW And 型矮新星は近年確認された矮新星のクラスであり、多色撮像による詳細な先行研究は報告されていない。多色撮像の利点として色変化が小さい場合、微細なスペクトルの傾きの変化をスリット分光よりも精度良く求めることができ、そこから温度や半径といった降着円盤の成分が得られる。また、矮新星の場合観測されるのは降着円盤からの放射だけでなく長波長側で判星からの寄与も含むと考えられる。可視光から近赤外線までのフラックス分布が分かれば判星からの寄与を差し引くことができる。本研究では多色撮像観測から IW And 型矮新星の色変化とその特徴を調べ、得られた結果の議論と理論モデルとの比較、検証を行うことを目的とする。

第2章 観測

2.1 対象天体の選定

先行研究で IW And 型矮新星と分類された天体をリストアップした。等級と色指数を 0.01 等の精度で測定するため、静穏時でも 14 等台よりも明るく、かつ本研究が観測を行った 2023 年 10 月から 2024 年 1 月の期間に東広島天文台から位置的に観測可能な天体を観測対象とした。IW And 型矮新星に分類された天体の天体名、赤経、赤緯、等級を表 2.1 に示す。等級は ASAS-SN¹と AAVSO²のデータベースを参照した。本研究では観測対象として KIC9406652 と IM Eri の 2 天体を選び多色撮像観測と解析を行った。

天体名	赤経	赤緯	等級	文献
BO Cet	2 6 39.273	-2 3 42.591	16-14	Kato et al. [2021]
KIC 9406652	19 31 29.149	+45 59 06.100	12.4-11.6	Kimura et al. [2020b]
HO Pup	7 33 54.176	-15 45 38.266	16-13.5	Lee et al. [2021]
BC Cas	23 51 17.422	+60 18 10.154	17.5-13.5	Kato and Kojiguchi [2020]
NSV 1586	4 24 41.107	+47 52 12.621	17-15.5	Brincat et al. [2020]
IM Eri	4 24 41.107	-20 7 11.759	12.1-11.3	Kato [2019]
FY Vul	19 41 39.933	+21 45 58.356	15-13.5	
V507	20 31 4.53	+47 22 00.319	17-14.5	
V513 Cas	00 18 14.915	+66 18 13.656	16.7-15.5	Hameury and Lasota [2014]
HX Peg	23 40 23.698	+12 37 41.712	16.2-13.0	
AH Her	16 44 10.006	+25 15 01.943	14.5-11.5	
AT Cnc	8 28 32.927	+25 20 03.045	14.5-12.5	
ST Cha	10 47 15.612	-79 28 6.861	16.5-13.5	

表 2.1: IW And 型矮新星

2.2 観測

観測に使用した望遠鏡と検出器について記載する。また観測した時の条件と観測日を表 2.2 と表 2.3 に示した。各条件は KIC9406652 と IM Eri で共通のものである。ディザリングとは検出器上での天体位置を少しずつ変えながら複数回に分けて観測する観測手法であり、宇宙線や検出器の欠損画素などによる影響を避けるために用いられる。

¹ASAS-SN, Sky Patrol, <https://asas-sn.osu.edu/>

²AAVSO, <https://www.aavso.org/LCGv2/>

望遠鏡	かなた望遠鏡	
検出器	可視近赤外線同時カメラ HONIR	
使用バンド (積分時間)	可視	B(75s),V(60s),Rc(45s),Ic(60s)
	近赤外	J(30s),H(45s),Ks(60s,45s)
観測期間	2023/10/20 - 2024/1/4	
ディザリング	5 点	

表 2.2: 観測条件

天体名	KIC 9406652	IM Eri
観測日	2023 年 10 月 20 日	2023 年 10 月 23 日
	2023 年 10 月 23 日	2023 年 10 月 24 日
	2023 年 10 月 26 日	2023 年 10 月 26 日
	2023 年 10 月 31 日	2023 年 10 月 29 日
	2023 年 11 月 2 日	2023 年 11 月 1 日
	2023 年 11 月 14 日	2023 年 11 月 12 日
	2023 年 11 月 22 日	2023 年 11 月 13 日
	2023 年 11 月 23 日	2023 年 11 月 14 日
		2023 年 11 月 19 日
		2023 年 11 月 20 日
		2023 年 11 月 24 日
		2023 年 11 月 25 日
		2023 年 11 月 28 日
		2023 年 12 月 10 日
		2024 年 1 月 4 日

表 2.3: 観測日

2.2.1 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡は宇宙科学センター附属東広島天文台に設置されている有効径 1.5m 光学赤外線望遠鏡 (図 2.1) である。国内に存在する望遠鏡の主鏡としては最大級であり五番目の大きさを誇る。また、方位軸まわり 6 度/秒、高度軸回り 3 度/秒という素早い駆動速度をもつため GRB などの突発天体にも対応可能である。かなた望遠鏡はナスミス焦点とカセグレン焦点を持ち、ナスミス焦点には HOWPol、カセグレン焦点には HONIR という検出器が取り付けられている。表 2.4 にかなた望遠鏡の主な諸元を示す。



図 2.1: かなた望遠鏡

光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡の有効径	1500mm
主鏡材	ULE (Ultra Low EXpansion; 調停膨張) 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 17 トン
搭載可能重量	カセグレン焦点 500kg ナスミス焦点 1000kg

表 2.4: かなた望遠鏡の主な諸元 (表中の括弧内の値は、新セラミック副鏡を用いた場合のもの) (広島大学宇宙科学センター)

2.2.2 HONIR

HONIR (Hiroshima Optical and Near-InfraRed camera) とは広島大学で開発された観測装置である。可視 1 チャンネルと近赤外 2 チャンネルの最大 3 チャンネル同時観測が可能で撮像モード、分光モード、偏光撮像/偏光分光モードをもつ。本研究では HONIR を用いた可視近赤外領域での撮像観測を行った。HONIR の主な諸元を表 2.5 に示す。

	可視光	近赤外
Type	CCD (fully-depleted back-illuminated)	HgCdTe VIRGO-2K
Vendor	Hamamatsu Photonics K. K.	Raytheon
Format (pixels)	2048 x 4096	2048 x 2048
Pixel Size (um)	15	20
Total Size (mm)	30.72 x 61.44	40.96 x 40.96

表 2.5: HONIR の主な諸元 (広島大学宇宙科学センター [2012])

2.3 データ解析

観測で得られた画像データから目的天体の等級を求めるために必要な解析の手順および測光方法を紹介する。本研究では独自性のある解析をしておらず、ここで紹介する解析方法は CCD による撮像観測データに対する標準的な解析方法である。

2.3.1 一次処理

観測装置から得られた直後のデータ (生データ) は検出器から読みだされたものを FITS 形式に変換しただけのデータであるため、光学系や観測装置に由来する信号が含まれている。このため生データは直接解析に使用できるわけではなく、様々な補正校正用データを用いてこの信号を取り除く操作が必要となる。この処理のことを一次処理と呼ぶ。

バイアス補正処理

バイアスとは露出時間ゼロで露光せずに読みだしたデータのことである。本来露出時間 0 秒で露光せずに読みだした場合は出力される読み取り値も 0 になるはずだが、CCD から画素ごとに読み出すときに負の値が発生しないよう一定のバイアス電圧をかけているため読み取り値は 0 にならない。一般的には各データのオーバースキャン領域の平均値などからバイアス値を推算し、それを全画素から減算することで補正を行う。オーバースキャンとは観測されたデータの読み出し前後に付加される露出時間 0 秒で読み出しを行ったことに相当するデータであり、画像に付加されている。この部分をオーバースキャン領域と呼び図 2.2 の左にみられる黒い縦線がオーバースキャン領域である。

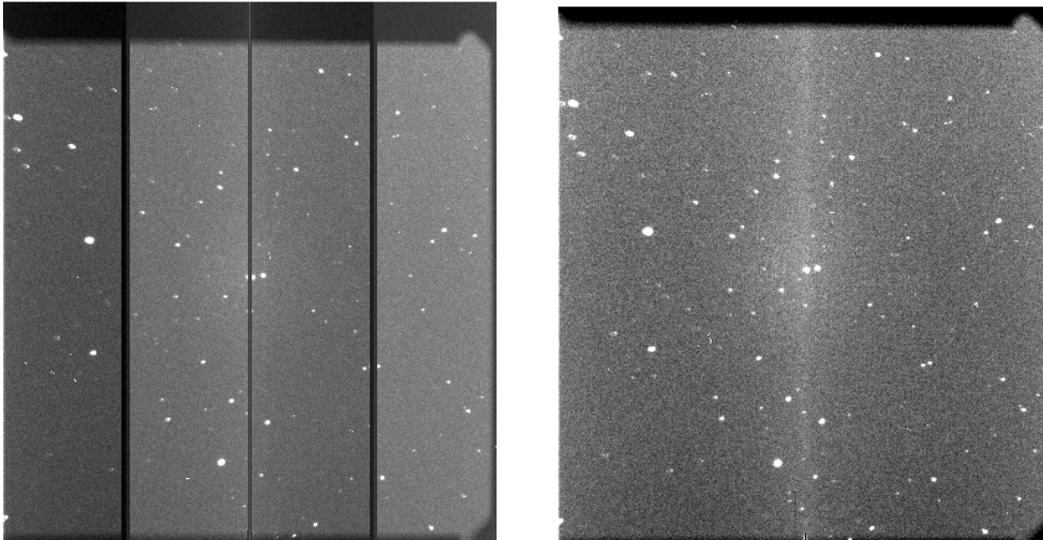


図 2.2: 生画像（左）とバイアス補正処理後の画像（右）

フラット処理

通常 2 次元検出器は 1 画素ごとの感度ムラや光学系の非一様性をもつ。この影響を補正するために取得するのがフラットフレームと呼ばれるフラット補正用データであり、人口光など一様光源からの光を望遠鏡を通して検出器に入射することで取得する。バイアス補正処理をした天体画像をフラットフレームで除算することで補正を行う。

ダーク引き

検出器には熱により検出器中に電荷が溜められてしまう現象がありダーク（暗電流）とよばれる。可視光領域では検出器が十分冷却されているためダークはほとんど無視できるのに対し、近赤外領域では無視することができない値となるためダークによる電荷を天体からの光による電荷から減算する必要がある。検出器のシャッターを閉じたまま対象天体と同じ露出時間で撮像することでダーク補正用データを得られ、バイアス補正処理と平均化したものを生データから減算する。

スカイ引き

背景光は可視領域では無視できる一方、近赤外領域では大気中の水分子や二酸化炭素分子の放射による寄与が無視できない値となるため生データから空の光（スカイ）を引く必要がある。撮像時に任意の数点に望遠鏡を向けるディザリングを行いそれらの中央値をとることで補正用データを作成、減算を行う。

2.3.2 測光

開口測光

開口測光とは対象天体の中心から一定の半径（開口半径、アパーチャー）をとる円内にある天体からの光を積分してその天体の明るさを見積もる測光手法である。（図 2.3）通常は天体直径の 2-3 倍をアパーチャーに

とする。また必要に応じて天体周辺に天体由来の光が入らない円環領域を設定し領域内に含まれる光のカウント数を大気による減光として天体光から引く。

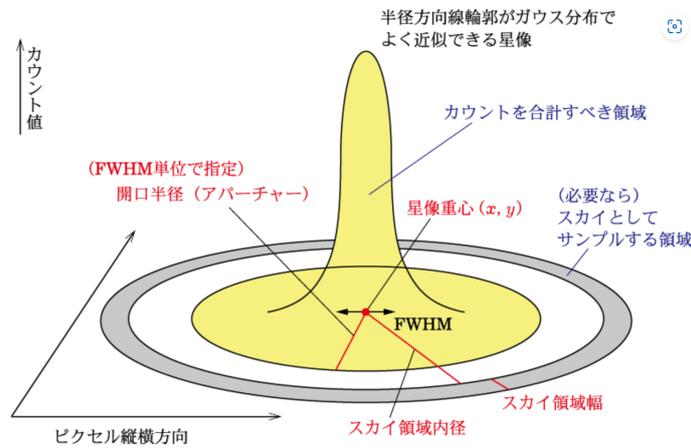


図 2.3: 開口測光のイメージ図 (Akihiko [2006])

相対測光

観測で取得した天体のカウント数から得られる等級は機械等級とよばれ、背景光などの影響を含むため天体本来の明るさを示しているわけではない。対象天体と同じ視野内にある等級が既知の星を標準星として測光することで相対的に対象天体の等級を求めることができる。対象天体の機械等級を m_{ao} 、標準星の機械等級とカタログ等級を m_{ac} 、 m_c とおくと対象天体の相対等級 m_{ro} は以下の式 2.1 で求めることができる。

$$m_{ro} = m_{ao} - m_{ac} + m_c \quad (2.1)$$

この方法では、 m_{ao} と m_{ac} が同じ大気減光を受けていると仮定できるため、 $m_{ao} - m_{ac}$ が大気減光の影響を受けていない量と見なすことができる。

第3章 結果

3.1 KIC 9406652

3.1.1 光度曲線

KIC 9406652 の可視側 (V バンド) と近赤外側 (J バンド) の光度曲線を図 3.1 に示す。図の縦軸は等級、横軸は MJD で青点が KIC 9406652、橙点が比較星を表す。KIC 9406652 は MJD 60237 から MJD 60240 の間に V バンドで約 1.0 等、 J バンドで約 0.4 等明るくなっており以降は $V = 12.5\text{--}13.0$ 、 $J = 11.8\text{--}12.1$ の比較的小さな幅で変動している。また KIC 9406652 には光度変化がみられるのに対し、同程度の等級をもつ比較星の等級は $V = \pm 0.009$ mag、 $J = \pm 0.007$ mag の範囲で一定であることから、KIC 9406652 の光度変化は測定誤差だけでは説明できず、天体本来の変動であると言える。

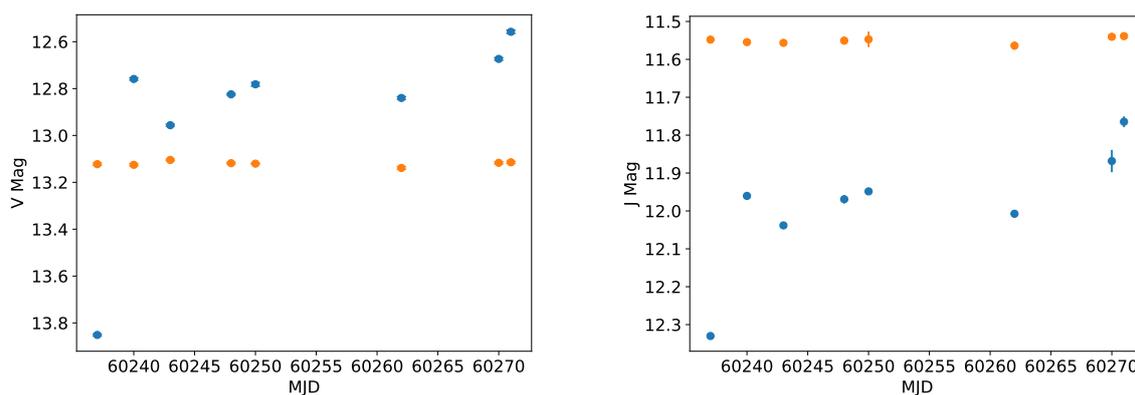


図 3.1: KIC 9406652 の可視側 (V バンド、左) と近赤外側 (J バンド、右) の光度曲線

図 3.2 は可視光領域の光度曲線と近赤外領域の光度曲線をまとめた多バンド光度曲線である。左図が可視側 (B 、 V 、 R_c 、 I_c) で右図が近赤外側 (J 、 H 、 K_s) となっている。期間中、 B バンドから J バンドはほとんど同じ変動をしている。一方、 H から K_s バンド、すなわち長波長側になるにつれて変動の振幅が小さくなり、一部の日では短波長側とは異なる変動も見られる。

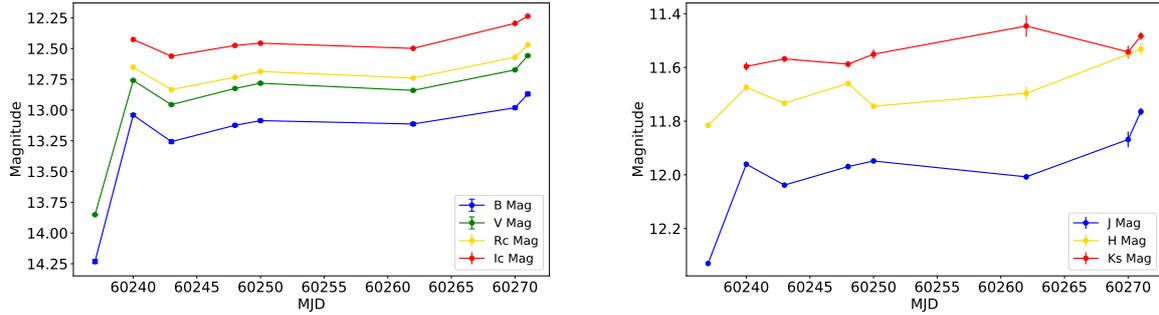


図 3.2: KIC 9406652 の可視側（左）と近赤外側（右）の多バンド光度曲線

3.1.2 色指数

色指数とは短波長側のバンドの等級から長波長側のバンドの等級を引いた値であり、例えば色指数 $B-V$ は以下のように定義される。

$$\begin{aligned}
 B-V &= m_B - m_V \\
 &= -2.5 \log_{10} \left(\frac{f_B}{f_V} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

ここで m_B , m_V は B バンドと V バンドの等級、 f_B , f_V はフラックスを表す。すなわち、色指数はスペクトルの傾きに対応する。黒体放射では色指数の値が小さいほど高温で青く、大きいほど低温で赤いことを表す。色指数 $B-V$, $B-R_c$, $B-I_c$ の時間変化を図 3.3 に示す。図 3.3 を光度曲線（図 3.1）と比較すると、増光初期の MJD 60237 から MJD 60248 の間は $B-V$, $B-R_c$, $B-I_c$ すべて光度曲線の変動と一致している一方、以降の変動は光度曲線と必ずしも一致しているわけではない。特に MJD 60262, MJD 60270, MJD 60271 の最後 3 点について、光度曲線では明るくなっているのに対し $B-I_c$ は 3 日とも同程度の色、 $B-V$ は赤くなっている。

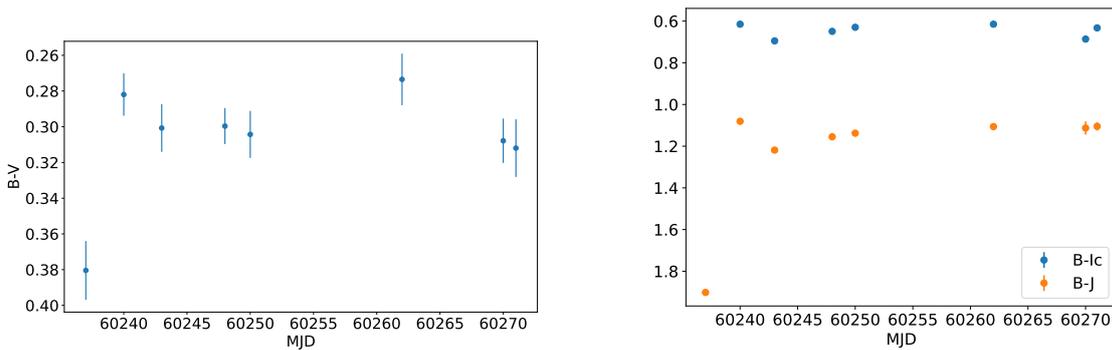


図 3.3: KIC 9406652 の色指数 $B-V$ （左）と $B-R_c$, $B-I_c$ （右）の時間変化

3.1.3 色等級図

色等級図とは縦軸に等級、横軸に色指数をプロットした図である。図 3.4 に縦軸 V 等級、横軸 $B-V$ の色等級図を示す。点線は右下にある初日 (MJD 60237) の点から日付順につないでいる。初日の暗く赤い状態から明るく青い状態に移動し、その後一度暗く赤い状態になった後次第に明るくなる。この時、 $B-V$ では青くならずむしろ赤くなる傾向が見られた。

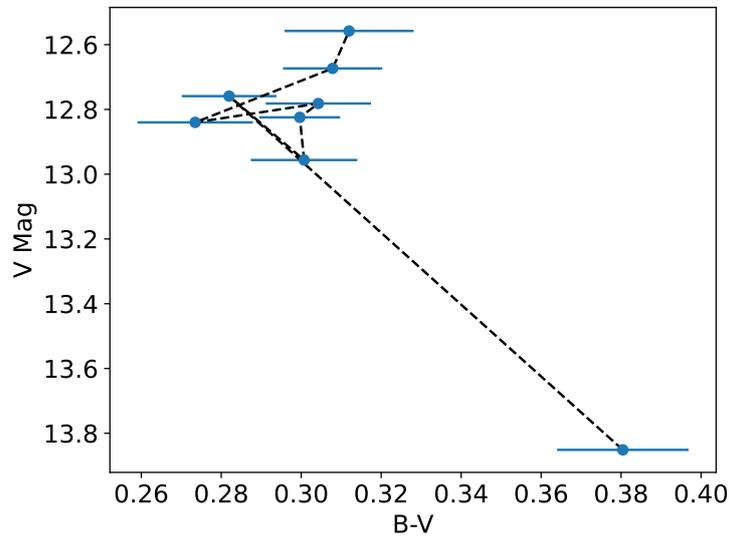


図 3.4: KIC 9406652 の横軸 $B-V$ 、縦軸 V 等級の色等級図

3.1.4 可視光-近赤外線フラックス分布

等級とフラックスの間には次の式 3.2、3.3 の関係がある。この式より観測で得られた等級から対象天体のフラックスを求めることができる。

$$m = -2.5 \log_{10} \left(\frac{f_{\lambda}}{f_{0\lambda}} \right) \quad (3.2)$$

$$f_{\lambda} = f_{0\lambda} 10^{-0.4m} \quad (3.3)$$

ここで m は対象天体の見かけの等級、 f_{λ} は対象天体のフラックス密度、 $f_{0\lambda}$ は基準となる天体のフラックス密度を表す。明るさの基準となる天体は通常こと座 α 星 (ベガ) を用いる。このようにベガを明るさの基準として相対的に対象天体の明るさを求める方法をベガ等級と呼ぶ。表 3.1 に今回使用した各バンドの中心波長と $f_{0\lambda}$ をまとめる。図 3.5 に MJD 60243 と MJD 60271 のフラックス分布を示す。

波長帯	中心波長 (μm)	$f_{0\lambda} (\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1})$
<i>B</i>	0.4448	6.26×10^{-8}
<i>V</i>	0.5505	3.66×10^{-8}
<i>R_c</i>	0.6588	2.15×10^{-8}
<i>I_c</i>	0.8060	1.13×10^{-8}
<i>J</i>	1.215	3.31×10^{-9}
<i>H</i>	1.654	1.15×10^{-9}
<i>K_s</i>	2.157	4.30×10^{-10}

表 3.1: 各バンドの中心波長とフラックス密度 (家正則 et al. [2007.7])

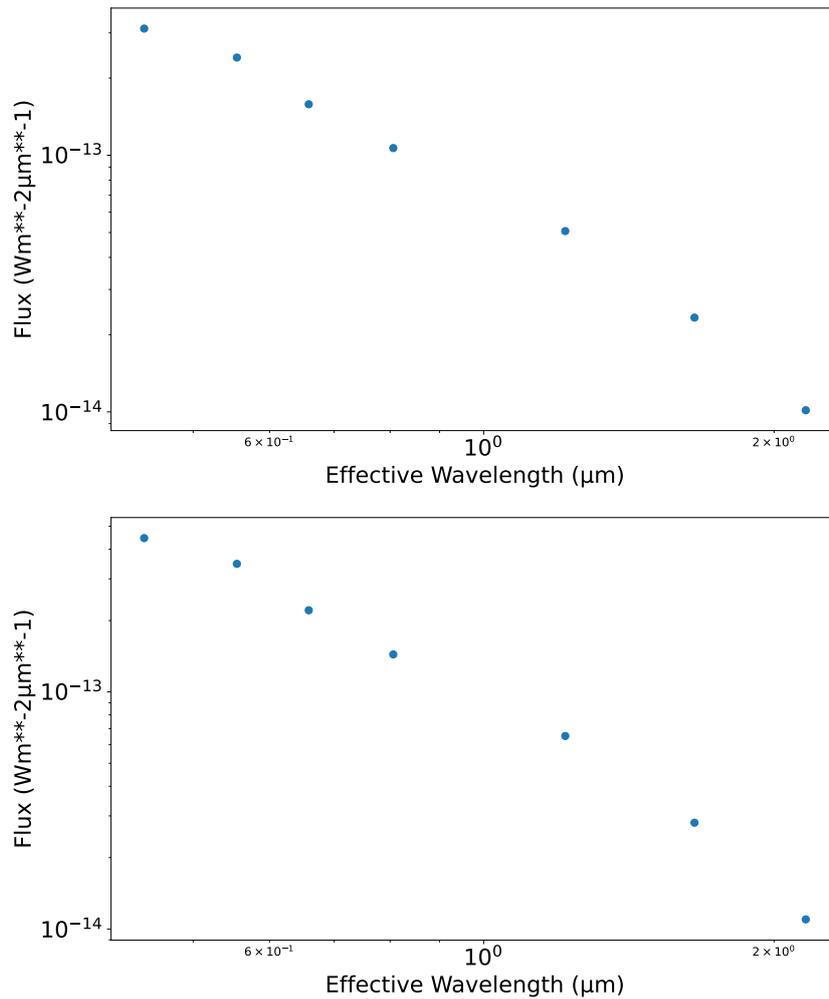


図 3.5: MJD 60243 (上)、MJD 60271 (下) の可視光-近赤外線フラックス分布

得られたフラックス分布に対し、黒体放射を用いたモデル $aB_{\lambda}(T) = a \frac{2\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$ を当てはめることで対

象天体の温度を求める。ここで、 a はスケールを合わせるための係数、 $B_\lambda(T)$ は単位面積あたり、単位波長あたりに放射されるエネルギー、 h はプランク定数、 c は光速、 k はボルツマン定数、 T は天体の温度である。しかし図 3.6 からわかるように、 $aB_\lambda(T)$ でフィッティングを行うと近赤外領域のフラックスが黒体放射モデルより強くなる（赤外超過）ため、適切に当てはめることができない。これについて、アウトバースト中の矮新星では降着円盤からの黒体放射が観測されるが、近赤外領域では低温の伴星からの黒体放射の寄与を含むため、赤外超過が起こったと考えられる。

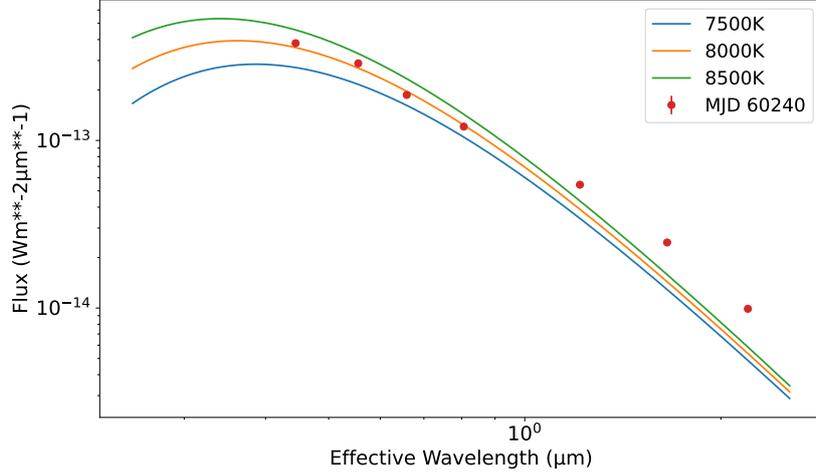


図 3.6: 黒体放射モデルと MJD 60240 のフラックス分布

そのため、降着円盤からの黒体放射成分に、伴星からの黒体放射成分を加えた二成分黒体放射モデル $10^{a_1}B_\lambda(T_1) + 10^{a_2}B_\lambda(T_2)$ を観測データに当てはめた。統計モデルはバイズモデルとして式 3.4、3.5、3.6、3.7 で表される。

$$p(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{y}) = \frac{p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta})p(\boldsymbol{\theta})}{p(\mathbf{y})} \quad (3.4)$$

$$p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^7 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left\{-\frac{(y_i - f(\boldsymbol{\theta}))^2}{2\sigma_i^2}\right\} \quad (3.5)$$

$$f(\boldsymbol{\theta}) = 10^{a_1} \frac{2\pi hc^2}{\lambda_i^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda_i k T_1}} - 1} + 10^{a_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda_i^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda_i k T_2}} - 1} \quad (3.6)$$

$$p(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi 500^2}} \exp\left\{-\frac{(T_2 - 4000)^2}{2 \times 500^2}\right\} \quad (3.7)$$

ここで $\boldsymbol{\theta}$ はモデルパラメータ $\boldsymbol{\theta} = (a_1, T_1, a_2, T_2)$ 、 σ_i はフラックスの測定誤差である。事前分布（式 3.7）には低温成分は伴星のものであると仮定し低温成分の温度に平均 4000K、標準偏差 500K の正規分布をおいた。事後分布（式 3.4）をマルコフ連鎖モンテカルロ法（Markov chain Monte Carlo methods; MCMC）で推定し各パラメータの最適値を求める。

MJD 60271 のデータを用いて、MCMC で事後確率を推定した際の、各パラメータ a_1 、 T_1 、 a_2 、 T_2 のトレースプロットを図 3.7 に示す。この図から、MCMC サンプルが定常分布に収束していることがわかる。また、事後分布のコーナープロットを図 3.8 に示す。いずれのパラメータも単峰の分布を示し、これはデータ

からパラメータが適切に制限されたことを意味する。MJD 60271 のフラックス分布と各パラメータの最適モデルを図 3.9 に示す。青線が高温側の成分 $10^{a_1} B_\lambda(T_1)$ の最適モデル、橙線が低温側の成分 $10^{a_2} B_\lambda(T_2)$ の最適モデル、赤線が2つの成分の合成とその不定性である。図 3.9 より可視領域では高温成分が支配的であるが I_c バンドになると低温成分の寄与が約 25%含まれるようになる。近赤外側になるにつれて低温成分の寄与は大きくなり、 H バンドや K_s バンドでは低温成分が高温成分を卓越している。以上の結果から、短波長側から長波長側のバンドになるにつれて伴星の寄与が大きくなり、特に H や K_s では伴星からの寄与が主となるため、降着円盤の温度や大きさの変化を見るには黒体放射 2 成分でフラックス分布を再現し高温成分と低温成分を分離する必要がある。色指数について、例えば $H - K_s$ だと伴星の色変化を、 $V - K_s$ だと光度がほぼ一定の伴星に対する降着円盤の相対的な色変化を表すため、降着円盤自体の温度や大きさを議論することができない。降着円盤そのものの議論をする場合には $B - V$ など伴星の寄与が小さい短波長側の色指数で議論する必要がある。

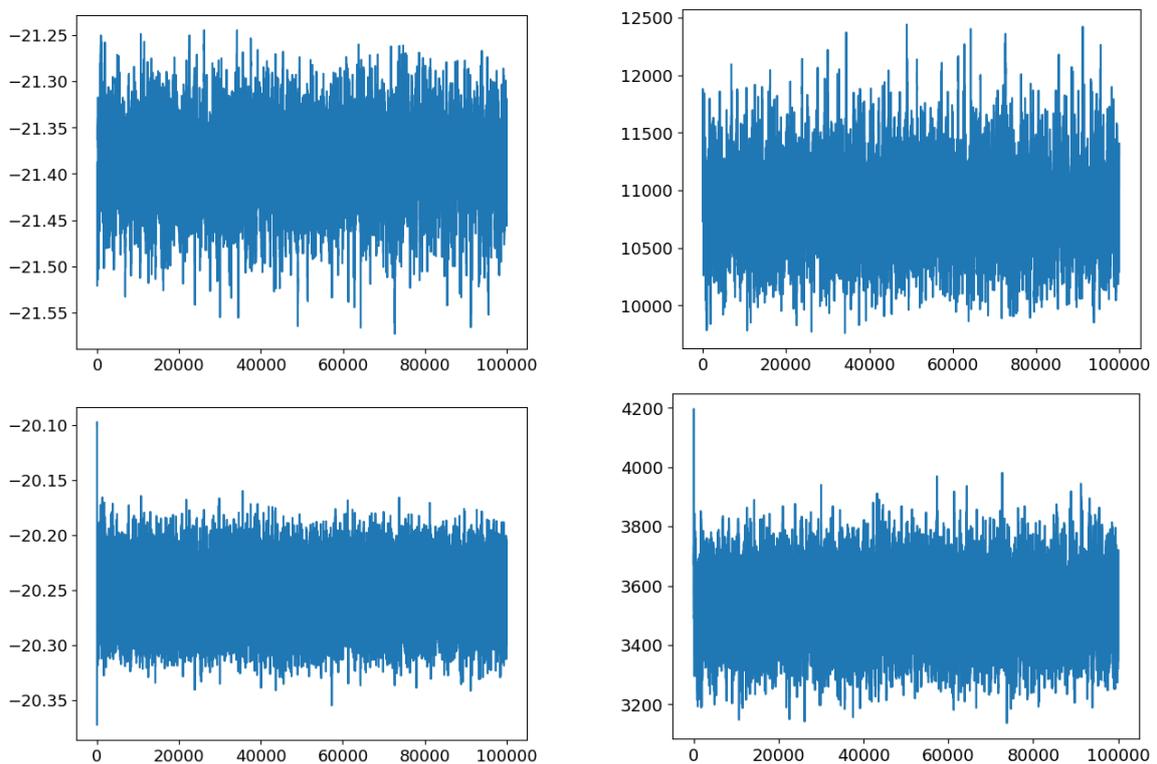


図 3.7: MJD 60271 の a_1 (左上)、 T_1 (右上)、 a_2 (左下)、 T_2 (右下) のトレースプロット

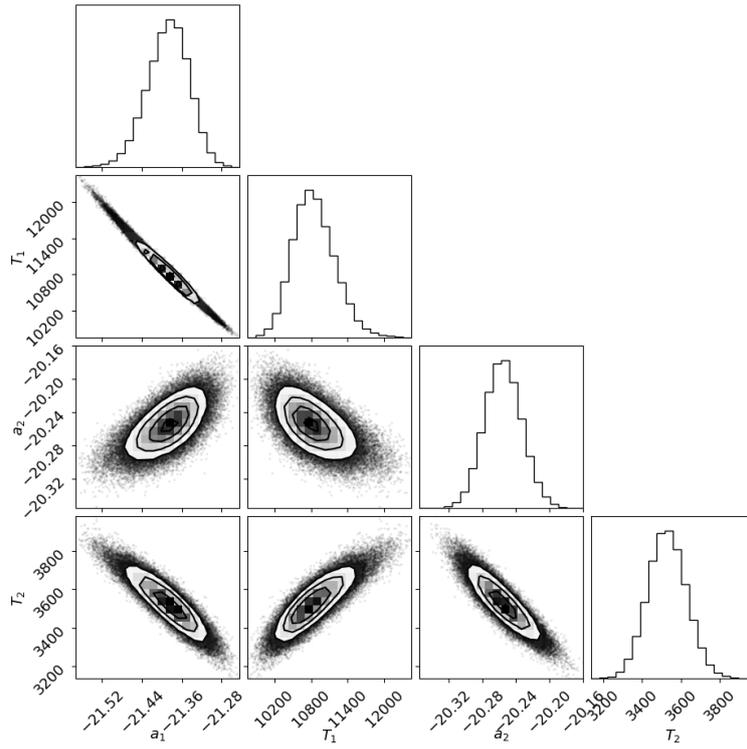


図 3.8: MJD 60271 のコーナープロット

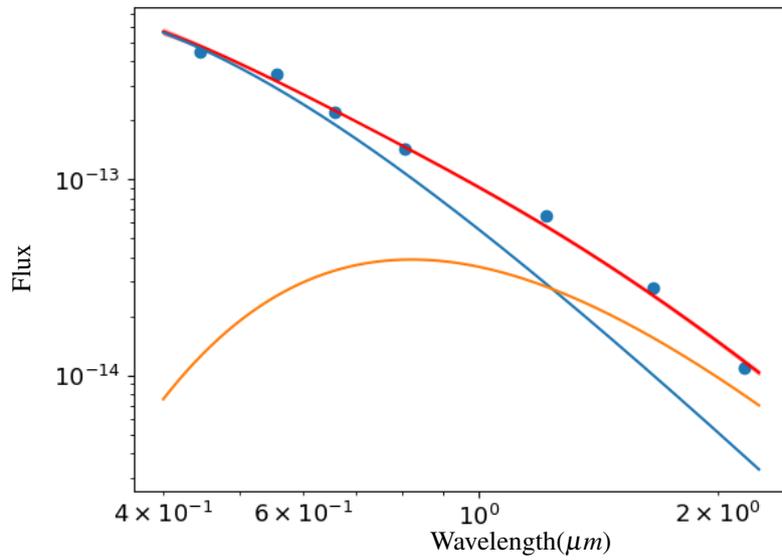


図 3.9: MJD 60271 のフラックス分布と最適化モデル

7バンドすべてのデータがそろっている日で MCMC による事後確率の推定を行った。高温成分と低温成分の温度の時間変化をプロットした図を図 3.10 に示す。横軸は MJD、縦軸は温度 (K) であり、青点が高

温成分の温度 T_1 、橙点が低温成分の温度 T_2 である。各温度の変化幅は T_1 は 9400K~12200K、 T_2 は 2400K~4000K であり、 T_2 は、 T_1 より変化幅が小さい。 T_1 と光度曲線（図 3.2）、 $B-V$ （図 3.3）を比較すると、 T_1 は色指数と同様、増光に対して温度が低くなる傾向がみられる。

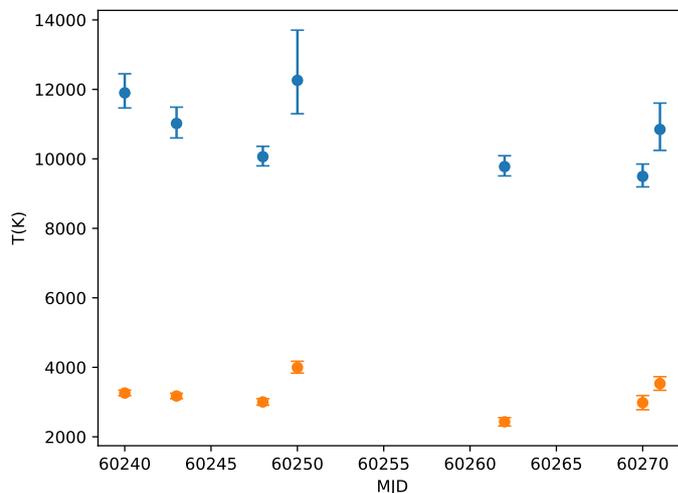


図 3.10: KIC 9406652 の温度変化

3.2 IM Eri

3.2.1 光度曲線

IM Eri の可視側 (V バンド) と近赤外側 (J バンド) の光度曲線を図 3.11 に示す。図の青点が IM Eri、橙点が比較星を表す。IM Eri の光度曲線には KIC 9406652 の光度曲線にあるような増光は見られず、 $V = 11.8-12.0$ の小さな変動が見られる。また比較星の等級は $V = \pm 0.016$ 、 $J = \pm 0.035$ の範囲で一定で IM Eri と比較星の光度変化に相関は見られないことから、IM Eri の ± 0.1 等の変動は天体本来のものであると言える。

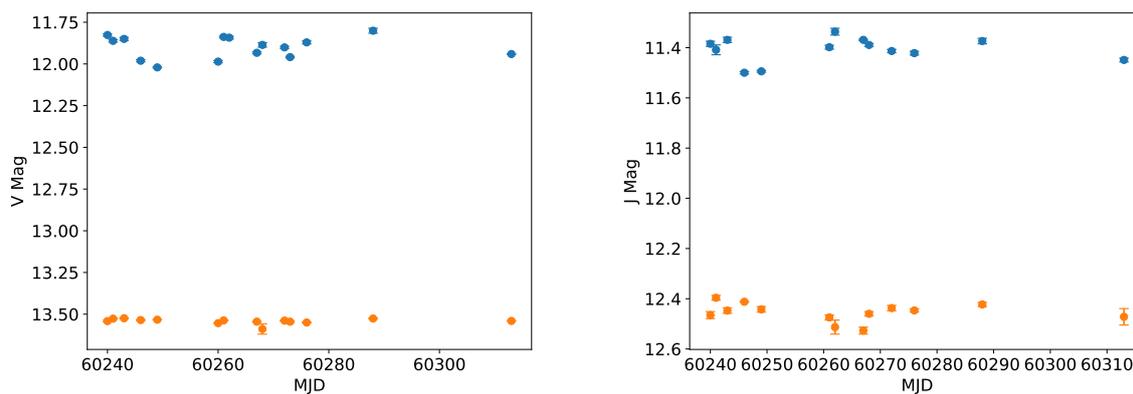


図 3.11: IM Eri の可視側 (V バンド、左) と近赤外側 (J バンド、右) の光度曲線

図 3.12 に可視光領域と近赤外領域の多バンド光度曲線を示す。 B バンドと他バンドを比べると MJD 60243 や MJD 60261、60262 にみられるような B バンドでは増光しない或いは減光しているのに対し他のバンドでは増光する現象が確認できる。

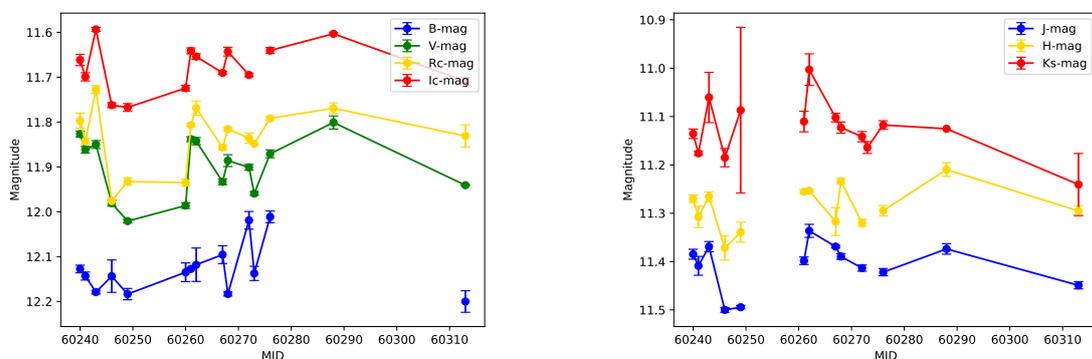


図 3.12: IM Eri の可視側 (左) と近赤外側 (右) の多バンド光度曲線

3.2.2 色指数

IM Eri の $B-V$ 、 $B-R_c$ 、 $B-I_c$ の時間変化を図 3.13 に示す。3.2.1 で述べたように図 3.12 の可視側のグラフで MJD 60241 から MJD 60243 と MJD 60260 から MJD 60261、MJD 60262 の間で V 、 R_c 、 I_c バンドでは増光しているのに対し B バンドでは増光しない、もしくは減光していた。これにより $B-V$ 、 $B-R_c$ 、 $B-I_c$ において MJD 60243、MJD 60261、MJD 60262 で赤くなっている。逆に B バンドを含まない R_c-I_c では図 3.14 からわかるようにこの時期は青くなっている。

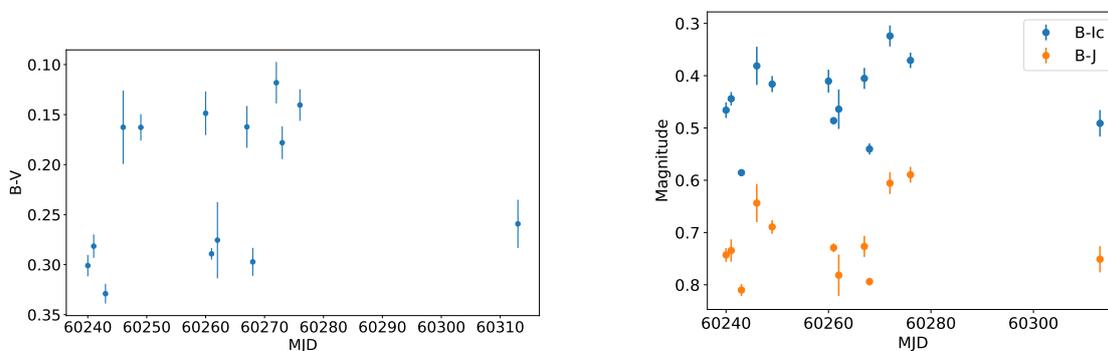


図 3.13: IM Eri の色指数 $B-V$ (左) と $B-R_c$ 、 $B-I_c$ (右) の時間変化

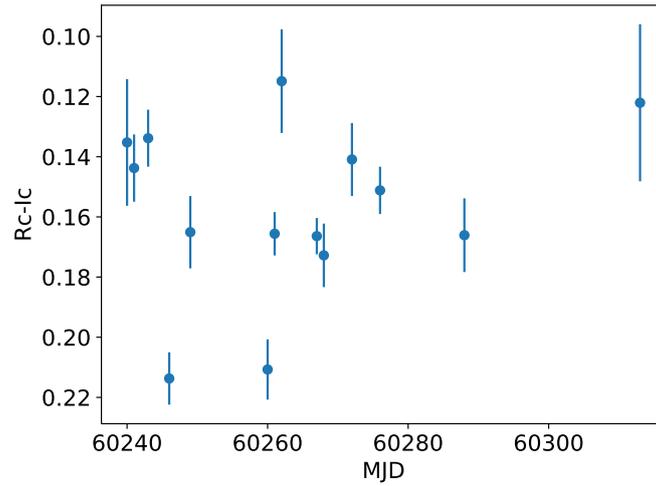


図 3.14: IM Eri の色指数 $R_c - I_c$ の時間変化

3.2.3 色等級図

IM Eri の $B - V$ と V 等級の色等級図を図 3.15 に示す。光度曲線や色指数より B 等級でのみ増光せず赤くなるため色等級図では明るく赤くなる傾向がみられる。逆に $R_c - I_c$ と R_c の色等級図 (図 3.16) では明るくなると青くなる傾向がみられる。

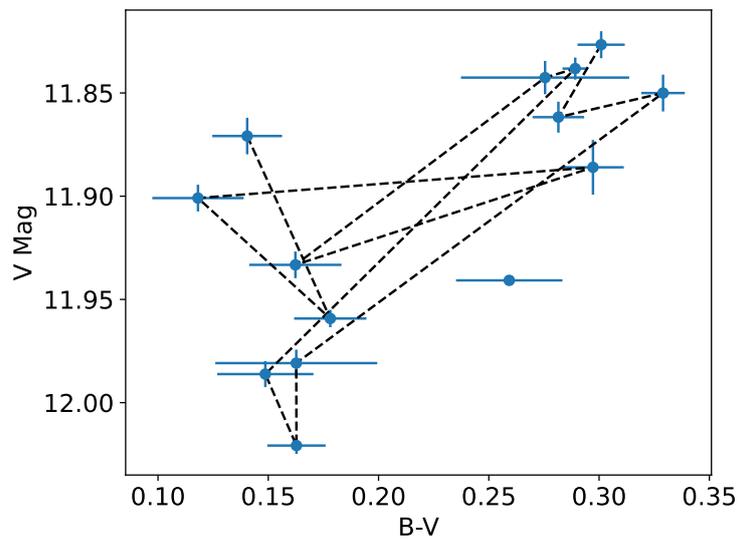


図 3.15: IM Eri の横軸 $B - V$ 、縦軸 V 等級の色等級図

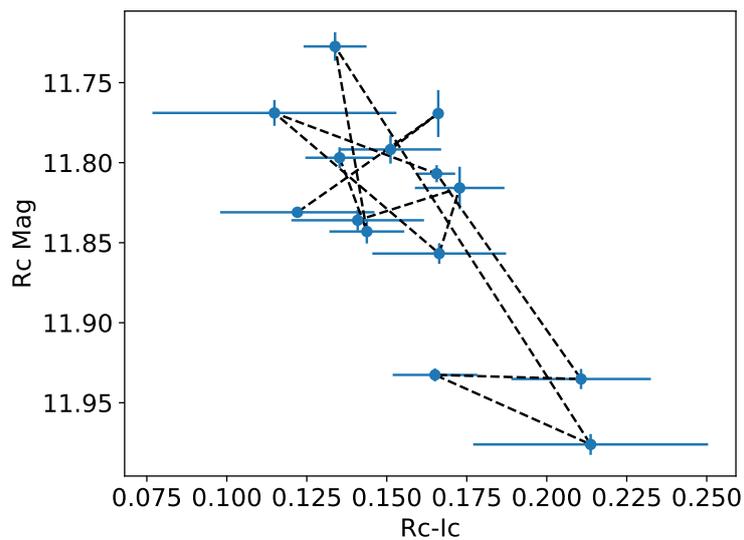


図 3.16: IM Eri の横軸 $R_c - I_c$ 、縦軸 R_c 等級の色等級図

3.2.4 可視光-近赤外線フラックス分布

MJD 60240 と MJD 60262 のフラックス分布を図 3.17 に、一成分黒体放射モデル $aB(T)$ と MJD 60267 のフラックス分布を図 3.18 に示す。KIC 9406652 と同様に可視領域のデータ点を黒体放射モデルに合わせると近赤外領域のフラックスがモデルよりも強くなり、赤外超過が起こっていることが確認できる。よって IM Eri のフラックス分布も降着円盤からの黒体放射だけでなく伴星からの黒体放射の寄与を含んでいることがわかる。

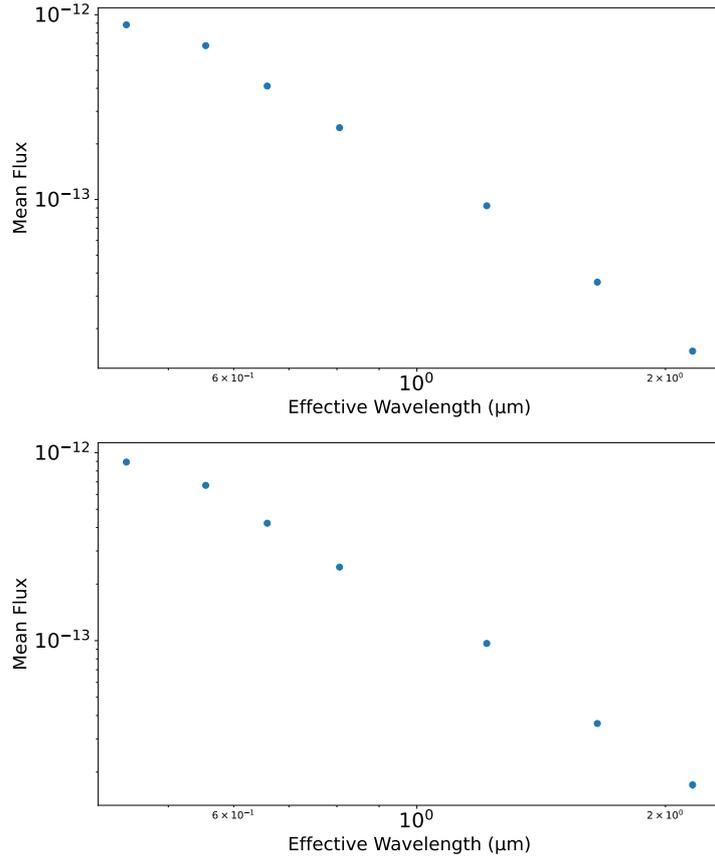


図 3.17: MJD 60240 (上)、MJD 60262 (下) の可視光-近赤外線フラックス分布

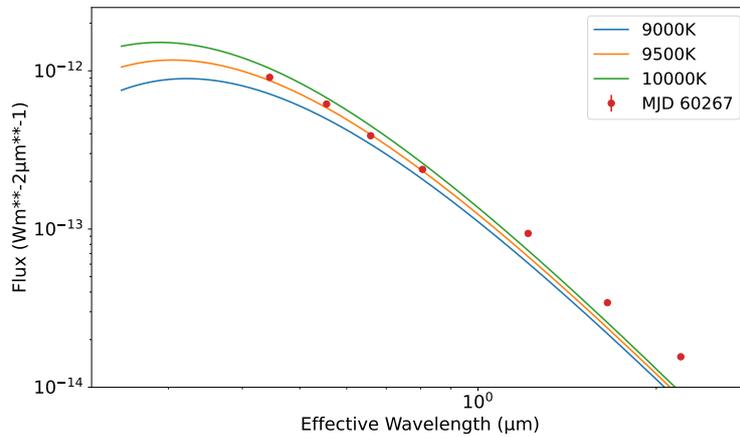


図 3.18: 黒体放射モデルと MJD 60267 のフラックス分布

得られたフラックス分布に対し対象天体の温度を求める。MJD 60262 を用いて MCMC で事後確率を推定した際の、各パラメータ a_1 、 T_1 、 a_2 、 T_2 のトレースプロットを図 3.19 に示し、この図より MCMC サン

プルが定常分布に収束していることがわかる。また、事後分布のコーナープロットを図 3.20 に示す。いずれのパラメータも単峰の分布を示し、データからパラメータが適切に制限されたことがわかる。図 3.21 にフラックス分布と各パラメータの最適モデルを示す。この図も短波長側では高温成分が卓越しているが長波長側のバンドになるにつれて伴星の寄与が大きくなり、少なくとも K_s では低温成分のほうが大きくなる。よって IM Eri も降着円盤そのものの温度や大きさの変化を見るには黒体放射二成分でフラックス分布を再現し高温成分と低温成分を分離する必要がある。

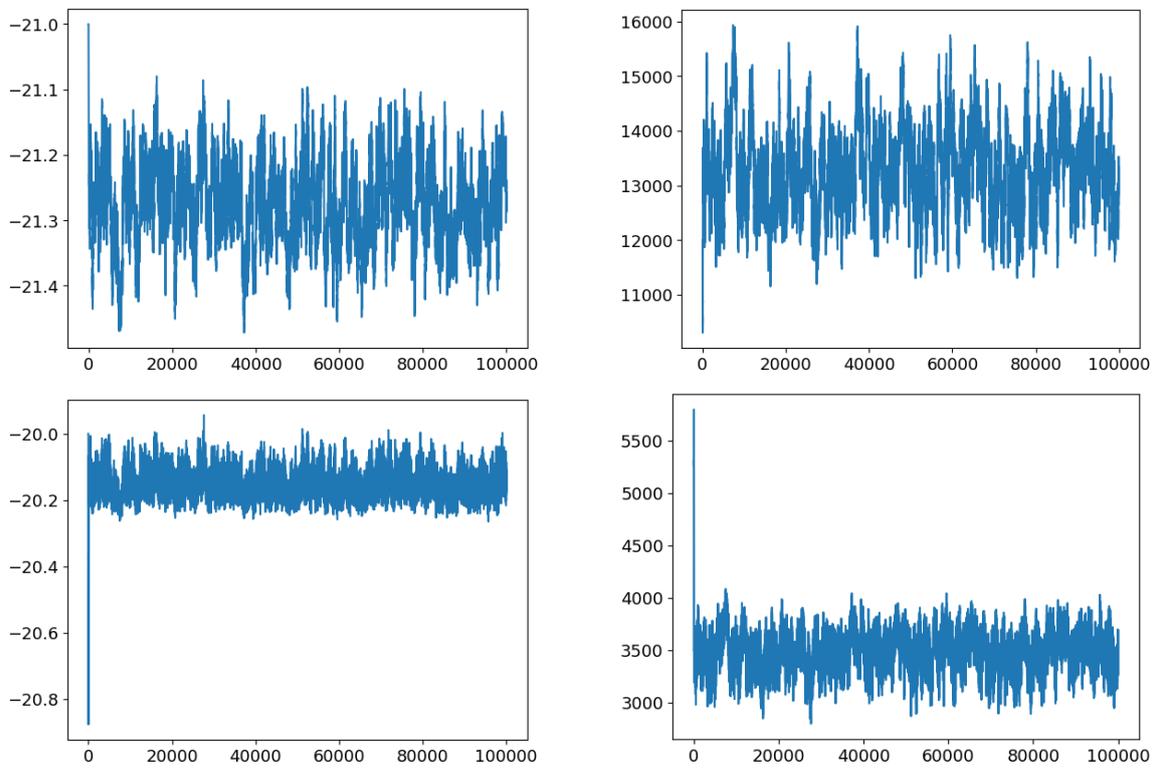


図 3.19: MJD 60262 の a_1 (左上)、 T_1 (右上)、 a_2 (左下)、 T_2 (右下) のトレースプロット

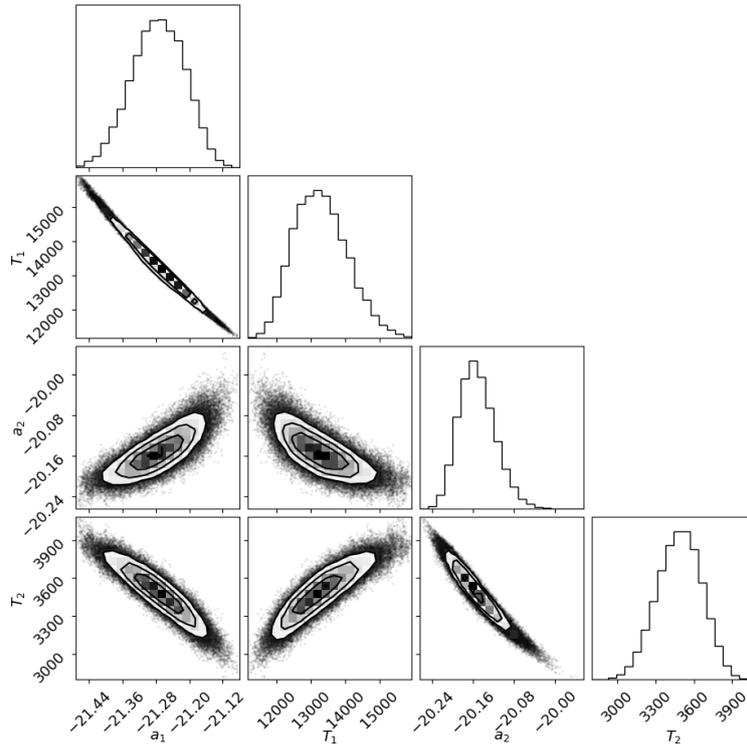


図 3.20: MJD 60262 のコーナープロット

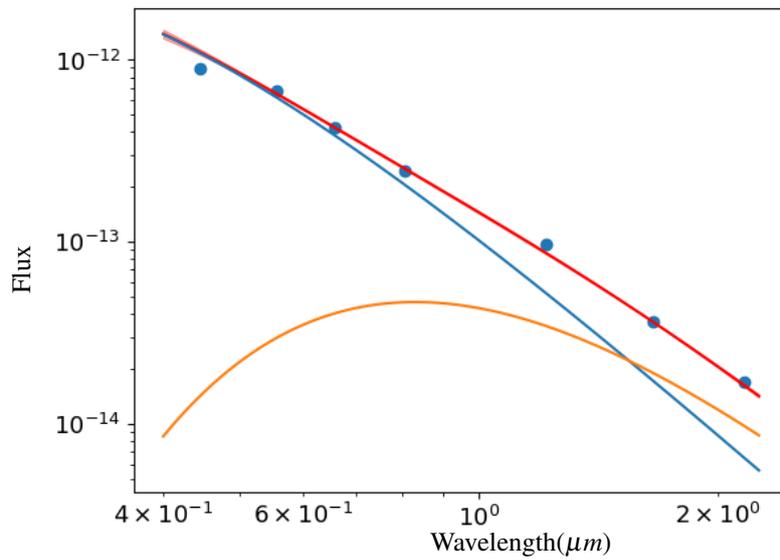


図 3.21: MJD 60262 のフラックス分布と最適化モデル

高温成分と低温成分の温度の時間変化を図 3.22 に示す。各温度の変化幅は T_1 は 8700K~20000K、 T_2 は 2700K~4400K であり、IM Eri も T_2 は、 T_1 より変化幅が小さい。また色指数と温度の変動の仕方を比較す

ると、 $B-V$ と T_1 の変動はほぼ一致する。

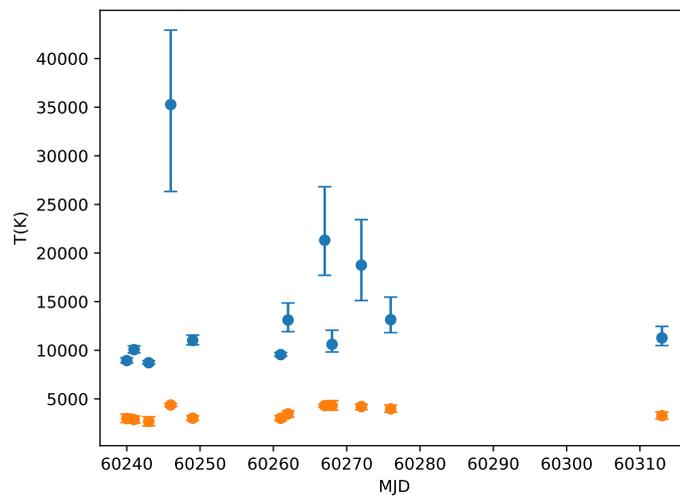


図 3.22: IMEri の温度変化

第4章 考察

4.1 円盤不安定モデルによる観測結果の解釈

本研究の観測期間中、KIC 9406652 と IM Eri が IW And 型現象のどの段階であったかを明確にするため、ASAS-SN で作成した KIC 9406652 と IM Eri の光度曲線を図 4.1 に示す。この図によると、KIC 9406652 は本研究で観測した MJD 60237 から MJD 60270 の間で、静穏時とアウトバースト時の中間の状態、かつ振幅 0.4 等に達する変動が見られる。これは典型的な IW And 状態と言える。同様に、IM Eri は MJD 60250 から MJD 60313 の間で緩やかに 0.1 等程度減光しており、この特徴から IM Eri は通常のスタンドスタイルの状態にあったことが分かる。

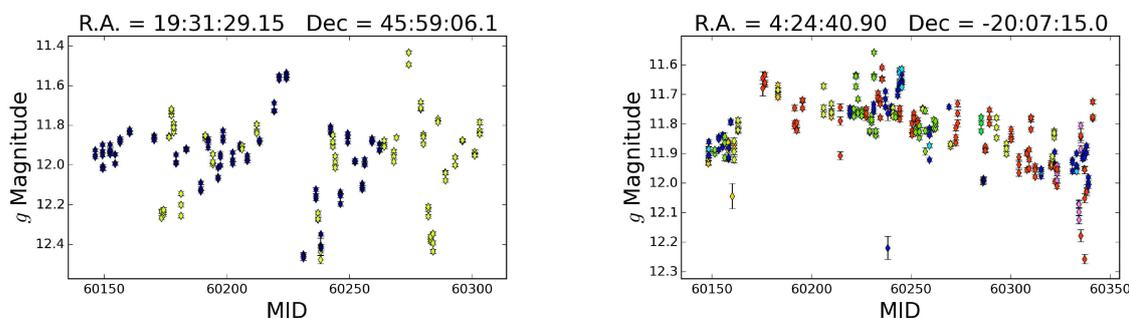


図 4.1: ASAS-SN で作成した KIC 9406652 (左) と IM Eri (右) の光度曲線 (ASAS-SN)

KIC 9406652 と IM Eri の $B-V$ で見られた明るくなりつつ赤くなる現象について議論する。シュテファン・ボルツマンの法則より星の光度 L は放射源の半径 R と温度 T 、シュテファン・ボルツマン係数 σ を用いた以下の式 4.1 で表される。

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \quad (4.1)$$

この式によると天体の光度は半径と温度に依存する。よって明るくなりつつ赤くなる、つまり L が大きくなりかつ T が小さくなるには半径 R が増加する必要がある。標準降着円盤では内側の方がより温度が高く外側になるにつれて低温になるため、より低温の面積が増加することは降着円盤が外に広がっていることを意味している。以上より、KIC 9406652 と IM Eri に見られた明るくなりつつ赤くなる挙動は、降着円盤半径が増加したことによって起きたと考えられる。

先行研究においても IW And 型矮新星の円盤半径が徐々に増加することを示唆する観測結果が確認されており、食を用いた IW And 型矮新星のアウトバースト機構の検証 (柴田真晃 et al. [2021]) では同様の結果が得られている。また、ネガティブスーパーハンプと呼ばれる軌道周期より数%短い周期変動現象におい

て、スタンドスティル中に半径に依存するネガティブスーパーハンプの周波数が緩やかに増加したことから、スタンドスティル中の円盤半径は増加していることが示唆されている (Kimura et al. [2020b])。本研究の結果は、スタンドスティル中の円盤半径の増加を多色撮像の観点から支持するものになったと言える。

しかし、提唱されている IW And 現象の機構を説明するモデルと円盤半径が徐々に増加するという結果を比較すると、現在のモデルでは説明が難しい点が多く存在する。モデルの一つである伴星からの質量輸送率が変動するモデルでは円盤が広がることを説明していない。また、図 4.2 より傾いた円盤モデルでもアウトバースト開始時に急激に円盤半径が増加する一方でスタンドスティル中に円盤半径は減少するため、円盤半径が徐々に増加することに対して矛盾が生じる。以上から、IW And 現象中の円盤半径の増加を説明するためにはこの 2 モデルとは違うモデルを考える必要性がある。

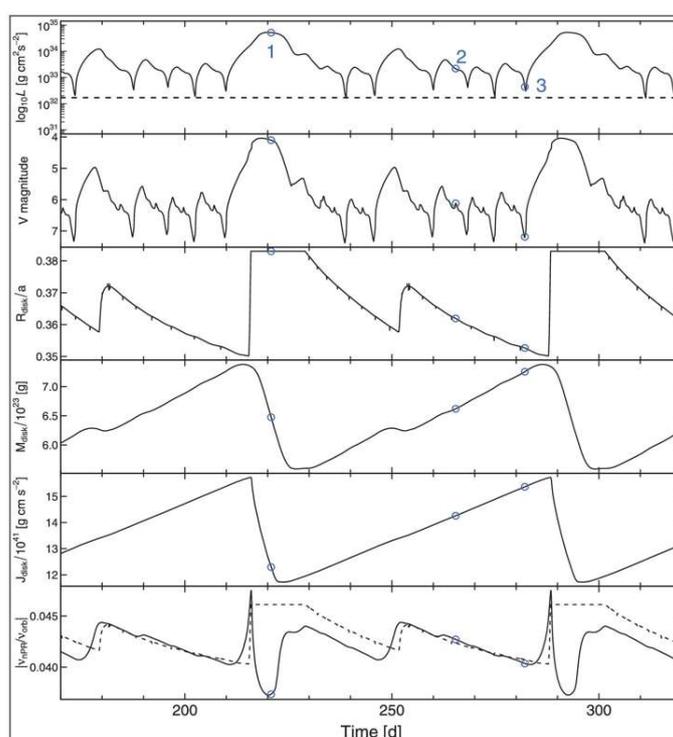


図 4.2: 傾いた降着円盤の時間発展。グラフは上から順に円盤の光度、 V 等級、半径、総質量、全角運動量、正規化された歳差運動 (Kimura et al. [2020a])

また IM Eri の V から J バンドで観測された赤いフレアについて、黒体放射のフレアとした場合 B バンドでのみ全く影響が見られないことを説明することが難しい。この現象が IW And 型矮新星に特有の現象であるか、IM Eri にのみ見られる現象であるかはさらにデータを増やして検証する必要がある。

第5章 まとめと今後

本研究では IW And 型矮新星の色変化を調べるため、かなた望遠鏡を用いた IW And 型矮新星 KIC 9406652 と IM Eri の多色撮像観測を行った。観測で得られた光度曲線から KIC 9406652 では IW And 型矮新星特有の光度変動を伴う中間状態、IM Eri ではスタンドスティル状態であることが分かった。さらに色指数の時間変化と光度曲線を比較すると、KIC 9406652 と IM Eri の $B-V$ で明るくなりつつ色が赤くなるという傾向が見られた。これは観測期間中、降着円盤の半径が徐々に増加していることを示唆しており、先行研究で述べられた結論を多色撮像の観点から支持するものとなった。一方でこの円盤半径の増加は現在提唱されている IW And 現象を説明するモデルでは説明が難しく、新たな理論モデルの必要性を示している。フラックス分布に黒体放射を用いたモデルを当てはめると近赤外領域で赤外超過が見られ、観測で得られたデータには伴星からの寄与があることがわかった。2成分黒体放射モデルを用いて MCMC による事後分布推定を行うと、 $B-V$ と似た時間変化をする高温成分と変化の小さい低温成分に分離でき、降着円盤の変化を調べる場合には $B-V$ を使用する必要があることがわかった。

今後は本研究内で原因の特定まで至らなかった IM Eri の赤いフレアや、静穏期とアウトバースト期を含めた IW And 型矮新星の色変化について理解を深めるため、さらに観測を続けていきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり、たくさんの方に助けていただきました。

まず指導教員である植村先生はお忙しい中毎週ゼミを開いてくださり、研究に必要な知識や解析を指導していただきました。また中々解析がうまくいかない私に適切な改善方法を示してくださったり、論文執筆の際は丁寧な添削をしてくださったりと大変お世話になりました。佐崎さんには観測について何もわからずにいた私に観測方法を教えてくださったほか、解析についてもアドバイスやコメントをしてくださいました。研究室の皆様、特に大部屋の方は作業の手が止まりやすい私を研究全般や論文執筆など様々な場面で助けていただきました。多くの方に支えられて本論文を執筆することができました。心からの感謝を込めて、この場をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- ASAS-SN. Sky patrol. <https://asas-sn.osu.edu/>.
- 嶺重慎. 矮新星のアウトバースト. *天文月報 = The astronomical herald*, 80(10):p284~289, 1987. ISSN 0374-2466. URL <https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R000000004-I3139375>.
- Taichi Kato. Three z camelopardalis-type dwarf novae exhibiting iw andromedae-type phenomenon. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 71(1):20, 2019.
- Tomita Akihiko. 「星の等級の算出」, 2006. <https://web.wakayama-u.ac.jp/~atomita/ccd/magnitude/>.
- Mariko Kimura, Yoji Osaki, Taichi Kato, and Shin Mineshige. Thermal-viscous instability in tilted accretion disks: A possible application to iw andromeda-type dwarf novae. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 72(2):22, 2020a.
- 野本憲一, 定金晃三, and 佐藤勝彦. 恒星. シリーズ現代の天文学 ; 第 7 巻. 日本評論社, 2009.7. URL <https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000002-I000010412162>.
- J-M Hameury and J-P Lasota. Anomalous z cam stars: a response to mass-transfer outbursts. *Astronomy & Astrophysics*, 569:A48, 2014.
- AAVSO. <https://www.aavso.org/LCGv2/>.
- Taichi Kato, Yusuke Tampo, Naoto Kojiguchi, Masaaki Shibata, Junpei Ito, Keisuke Isogai, Hiroshi Itoh, Franz-Josef Hamsch, Berto Monard, Seiichiro Kiyota, et al. Bo ceti: Dwarf nova showing both iw and-type and su uma-type features. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 73(5):1280–1288, 2021.
- Mariko Kimura, Yoji Osaki, and Taichi Kato. Kic 9406652: A laboratory for tilted disks in cataclysmic variable stars. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 72(6):94, 2020b.
- Chien-De Lee, Jia-Yu Ou, Po-Chieh Yu, Chow-Choong Ngeow, Po-Chieh Huang, Wing-Huen Ip, Franz-Josef Hamsch, Hyun-il Sung, Jan Van Roestel, Richard Dekany, et al. Ho puppis: Not a be star, but a newly confirmed iw and-type star. *The Astrophysical Journal*, 911(1):51, 2021.
- Taichi Kato and Naoto Kojiguchi. Bc cassiopeiae: First detection of iw andromedae-type phenomenon among post-eruption novae. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 72(6):98, 2020.
- Stephen M Brincat, Charles Galdies, Kevin Hills, and Winston Grech. The reclassification of nsv 1586 from a suspected cepheid star to a ug class system. 2020.
- 広島大学宇宙科学センター. 「概要」. <https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/abstract>.

広島大学宇宙科学センター. 「design and specifications」, 2012. <https://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/honir/specification/spec-e.html>.

家正則, 岩室史英, 舞原俊憲, 水本好彦, and 吉田道利. **宇宙の観測**. *I. Number 1 in シリーズ現代の天文学*; 第15巻. 日本評論社, 2007.7. URL <https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000002-I000008662254>.

柴田真晃, 反保雄介, 小路口直冬, 若松恭行, 加藤太一, 野上大作, and 木邑真理子. 食を用いた IW And 型矮新星のアウトバースト機構の検証. **日本天文学会 2021 年春季年会**, W31a, 3 2021.

広島大学宇宙科学センター. 「センター紹介」, 2021. <https://www.hiroshima-u.ac.jp/hasc/introduction/>.