

ブラックホールX線連星の可視偏光観測によるジェットの研究

広島大学大学院理学研究科物理学専攻
高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室

M162786 廣地 諄

主査 植村 誠 副査 平谷 篤也

日付:2018年2月9日

概要

ジェットとは、中心天体から双方に伸びるプラズマの流れであり、ジェットを出している天体は、活動銀河核やブラックホール X 線連星などがある。しかしながら、依然としてジェットの発生機構はわかっていないのが現状である。活動銀河核ジェットでは降着ガスのエネルギーだけではジェットの持つ総パワーを説明できず、回転する中心ブラックホールから磁場を介したエネルギー供給の必要性が議論されている。よりスケールの小さい X 線連星でも同様の研究が必要だが、ジェットの総パワーを調べるためには幅広い波長域でジェットからの放射強度を測定する必要がある。ブラックホール X 線連星の中でも一部の天体で電波領域での放射が観測されているが可視域での寄与についてはまだわかっていない。ジェットからの放射は強く偏光しているため偏光観測が有効だが、一方で星間物質との相互作用で生じる偏光成分と天体固有の偏光成分を分離する必要がある。ブラックホール X 線連星 GRS1915+105 は広島大学にあるかなた望遠鏡 HONIR で 2014 年 5 月 30 日、7 月 23 日 H バンドで偏光観測が行われたが、観測数が十分ではなかったため近赤外領域での偏光があると断定するに至らなかった。本研究では GRS 1915+105 の偏光モニター観測を行い、赤外線領域での偏光パラメータの時間変動を検出することを目的とする。観測は 2016 年 8–11 月に広島大学かなた望遠鏡で行った。観測の結果、GRS 1915+105 の偏光度が 5–25% の範囲で時間変動することを明らかにした。また、周辺の星 A, B, C の偏光パラメータは $(Q/I, U/I) \sim (0.3, -1.0)$ 付近に集中していることがわかった。この偏光成分が星間偏光と考えられる。GRS 1915+105 の偏光度が小さい状態もこの星間偏光と同様の偏光方位角を持っており、星間偏光成分が寄与している可能性が高い。一方、偏光度が高い状態において偏光度と偏光方位角・可視光度・X 線光度との間に明らかな相関関係は見られず、単一の偏光放射源では説明できない。少なくとも一部の偏光方位角はジェットの方角と一致しており、このことは検出された偏光成分とジェットの関係を示唆する。

目次

第 1 章	研究の背景:ブラックホール X 線連星におけるジェットの研究	3
1.1	ジェット	3
1.2	ブラックホール X 線連星	5
1.3	GRS1915+105	9
1.4	本研究の目的	18
第 2 章	データ解析	19
2.1	観測装置	19
2.2	画像の一次処理	21
2.3	測光	21
2.3.1	アパーチャ測光と PSF 測光	22
2.3.2	相対測光	22
2.4	偏光パラメータの導出	23
2.5	観測ログ	26
第 3 章	結果	27
3.1	GRS 1915+105 の光度変動	27
3.2	GRS 1915+105 の偏光パラメータ	28
第 4 章	考察	31
4.1	近赤外等級と偏光度の関係	31
4.2	X 線の光度変動と偏光度の関係	32
第 5 章	結論	35

目 次

1.1	活動銀河核 ジェットのイメージ図 [1]	3
1.2	ブレーザーの SED[2]	4
1.3	ジェットの総パワーと降着エネルギーの関係 [3]	5
1.4	LMXB の想像図 [4]	6
1.5	GRS 1915+105 の電波干渉計画像 [5]	7
1.6	ブラックホール X 線連星 XTE J1118+480 の多波長スペクトル [7]	8
1.7	V404 Cyg の SED[8]	8
1.8	V404 Cyg の SED-2[9]	9
1.9	GRS 1915+105 の長時間 X 線光度変動 [10]	10
1.10	GRS 1915+105 の短時間 X 線光度変動 [10]	11
1.11	GRS 1915+105 の状態遷移 [10]	12
1.12	GRS 1915+105 の電波ジェットの方法 [6]	13
1.13	GRS 1915+105 K_s バンドの光度変動 [11]	14
1.14	GRS 1915+105 K-バンドの光度変動 (かなた望遠鏡)[12]	15
1.15	GRS1915+105 の赤外線領域の偏光度スペクトル [13]	16
1.16	GRS1915+105 の偏光パラメータ $Q/I, U/I$ [14]	16
1.17	GRS1915+105 の偏光マップ [14]	17
1.18	GRS1915+105 の近傍の偏光マップ [14]	18
2.1	東広島天文台 [15]	19
2.2	HONIR[15]	20
2.3	本研究対象天体	22
2.4	偏光観測 [17]	24
3.1	GRS 1915+105 の光度変動	27
3.2	GRS 1915+105 の光度変動 (2008 年と 2009 年)[19]	28
3.3	GRS 1915+105 の偏光パラメータ ($Q/I, U/I$)	29
3.4	偏光度の時間変動	30
3.5	偏光方位角の時間変化	30
4.1	近赤外等級と偏光度の関係	32
4.2	等級と偏光方位角の散布図	32
4.3	X 線フラックスと偏光度の散布図 [22]	33
4.4	X 線の Hardness ratio と近赤外偏光度の散布図 [22]	34

第1章 研究の背景:ブラックホール X 線連星におけるジェットの研究

本章では研究の背景として、ジェットとブラックホール X 線連星について概観し、具体的な観測対象である GRS 1915+105 の先行研究について書く。

1.1 ジェット

ジェットとは、中心天体から双方に細く長く伸びるプラズマの流れである。大きさは恒星サイズから銀河サイズまで幅広く、プラズマの速度は光速の数%から 99%まで加速される。しかし、どのように加速されているのかや、発生機構についてなどまだ解明されていない点も多い。一例として活動銀河核ジェットの構造を図 1.1 に示す。ブラックホールのようなコンパクトな重力源の周りに降着円盤が形成され、降着ガスの一部が中心付近からジェットとして噴出している。活動銀河核ジェットが観測者の方向を向いている天体はブレイザーと呼ばれる。

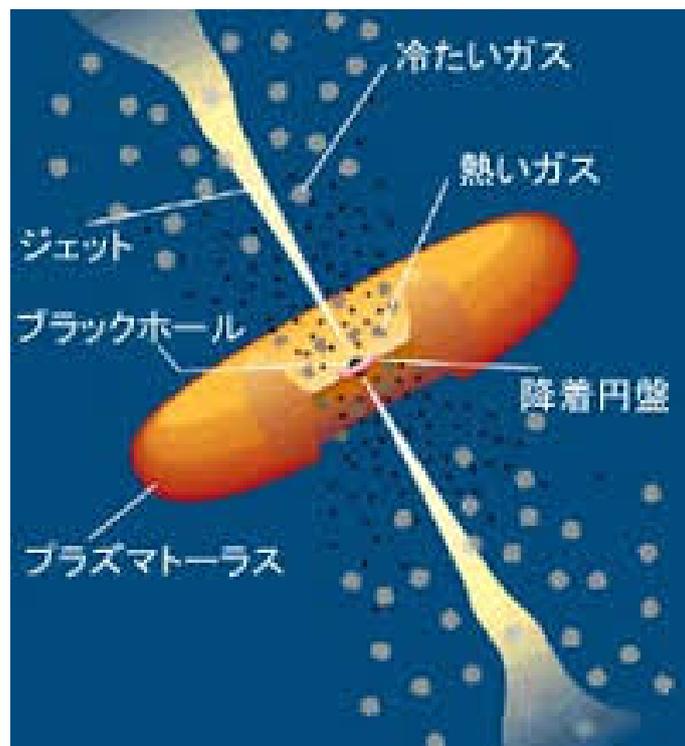


図 1.1: 活動銀河核 ジェットのイメージ図 [1]

ブレイザーの放射は電波からガンマ線までジェットからの放射が卓越している。これは相対論的な速度で放射源が近づいていることでビーミング効果によってジェットからの放射が強くなるためである。図 1.2 はブレイザーのスペクトルエネルギー分布 (SED) を示している。図 1.2 はふた山構造をしており、低エネルギー側では赤外から X 線で極大を持つ。低エネルギー側はシンクロトロン放射によるもので高エネルギー側の放射では逆コンプトン散乱であるという考えが主流である。

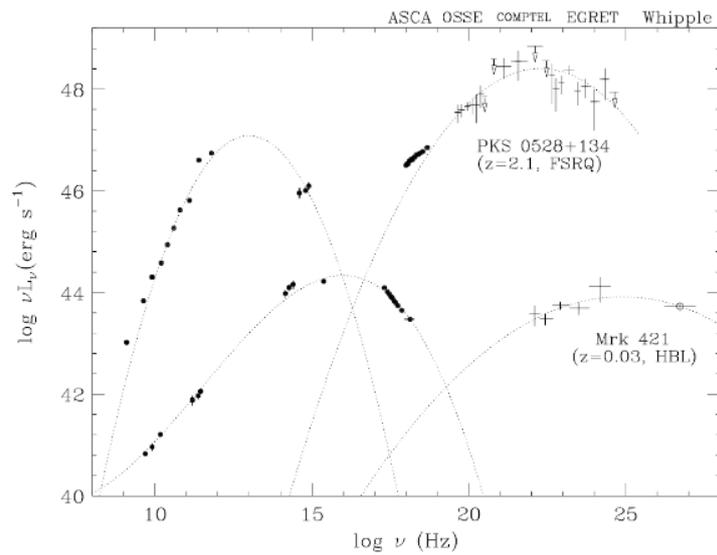


図 1.2: ブレイザーの SED[2]

図 1.2 のようにジェットからの放射が幅広い波長帯で観測することができれば、ブレイザーの SED 解析から活動銀河核ジェットの総エネルギーなど、ジェットの物理量が推定できる。

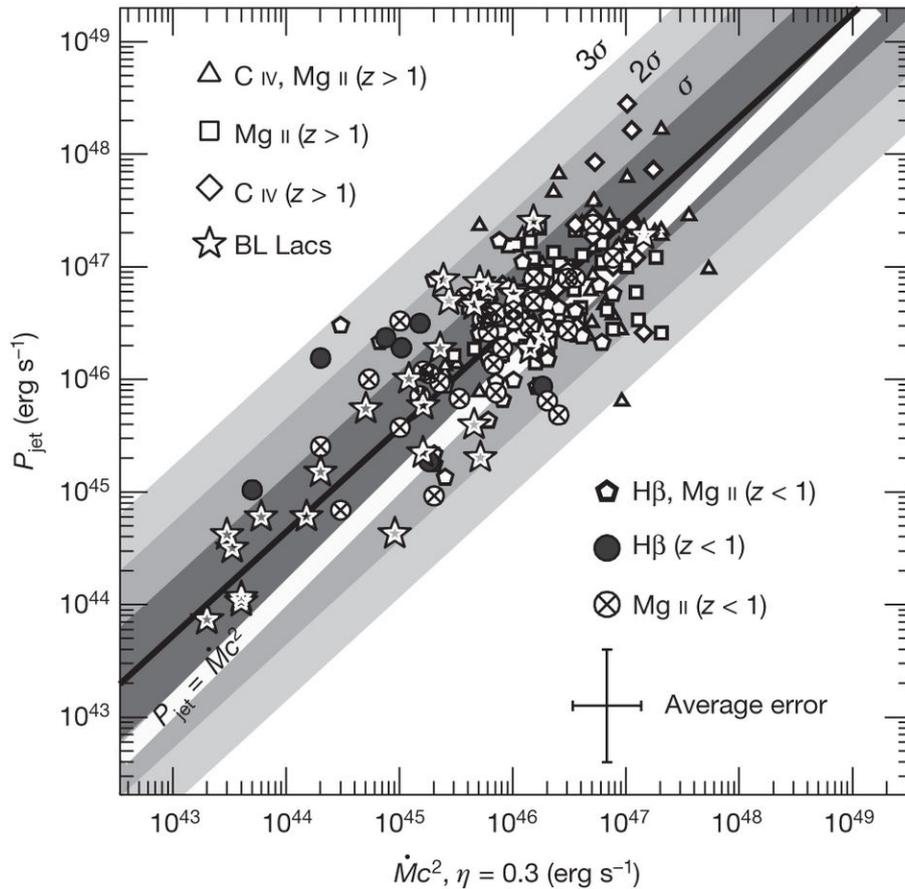


図 1.3: ジェットの総パワーと降着エネルギーの関係 [3]

図 1.3 はそのような SED 解析によって推定されたジェットの総エネルギーと降着エネルギーの関係を示しており、降着円盤のパワーよりもジェットのパワーの方が大きいことが示され、ブラックホールから磁場を介した間接的なエネルギー抜き取り機構が必要であることが示されている。活動銀河核ジェットと、同じくブラックホールを中心にもつが、よりスケールの小さい X 線連星ジェットが同じ性質を持つかどうかは降着円盤とジェットの相互作用の物理を知る上で興味深い。そのような研究のためには電波からガンマ線域の幅広い電波から周波数領域でジェットからの放射の寄与を決めることが重要である。

1.2 ブラックホール X 線連星

ブラックホール X 線連星とは、恒星質量ブラックホールと恒星が連星系をなしている天体である。また、ブラックホール X 線連星は恒星の質量によって 2 種類に分類される。表 1.1 にその分類を示す。

図 1.4 は LMXB の想像図である。

X 線連星	特徴
HMXB(High Mass X-ray Binary)	恒星からの星風の一部がブラックホールに降着する
LMXB(Low Mass X-ray Binary)	ラグランジュ点を通過した後に降着円盤を形成する

表 1.1: X 線連星の種類

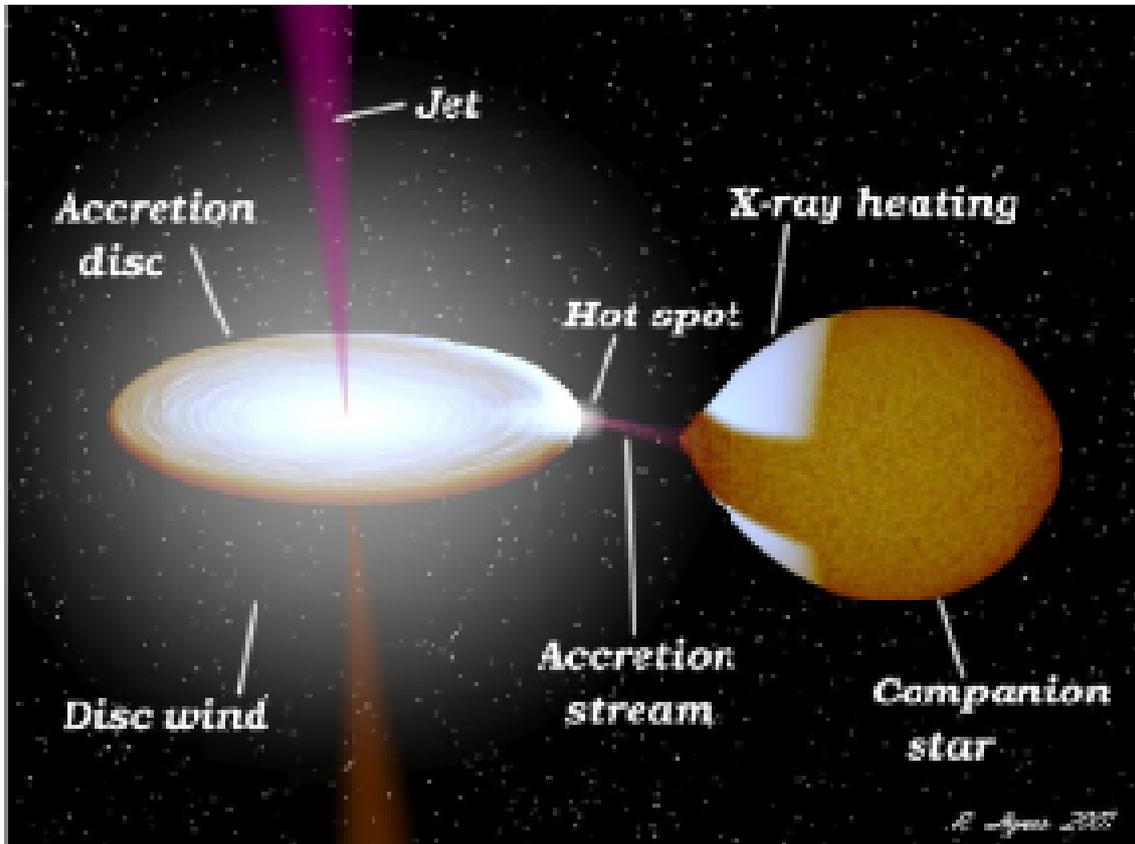


図 1.4: LMXB の想像図 [4]

一部の X 線連星では電波観測によってジェットが検出されている。図 1.5 に GRS 1915+105 の電波干渉計画像を示す。この図から、電波源がジェット方向に移動していく様子がわかる。

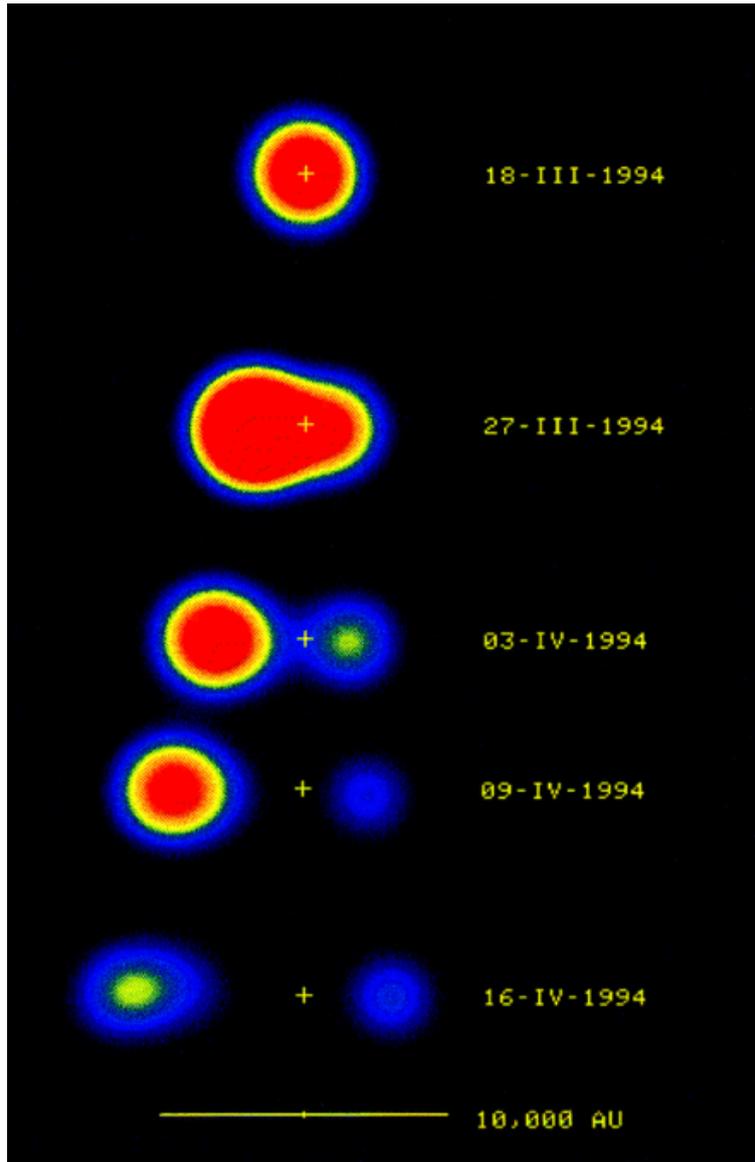


図 1.5: GRS 1915+105 の電波干渉計画像 [5]

ジェットの総パワーを推定するためには電波から線にかけてジェットの放射の寄与を調べる必要があるが、ブレイザーとは異なり、近赤外線域から X 線域にかけては恒星や降着円盤からの放射の寄与が卓越するため、ジェット成分のみを分離するのは容易ではない。

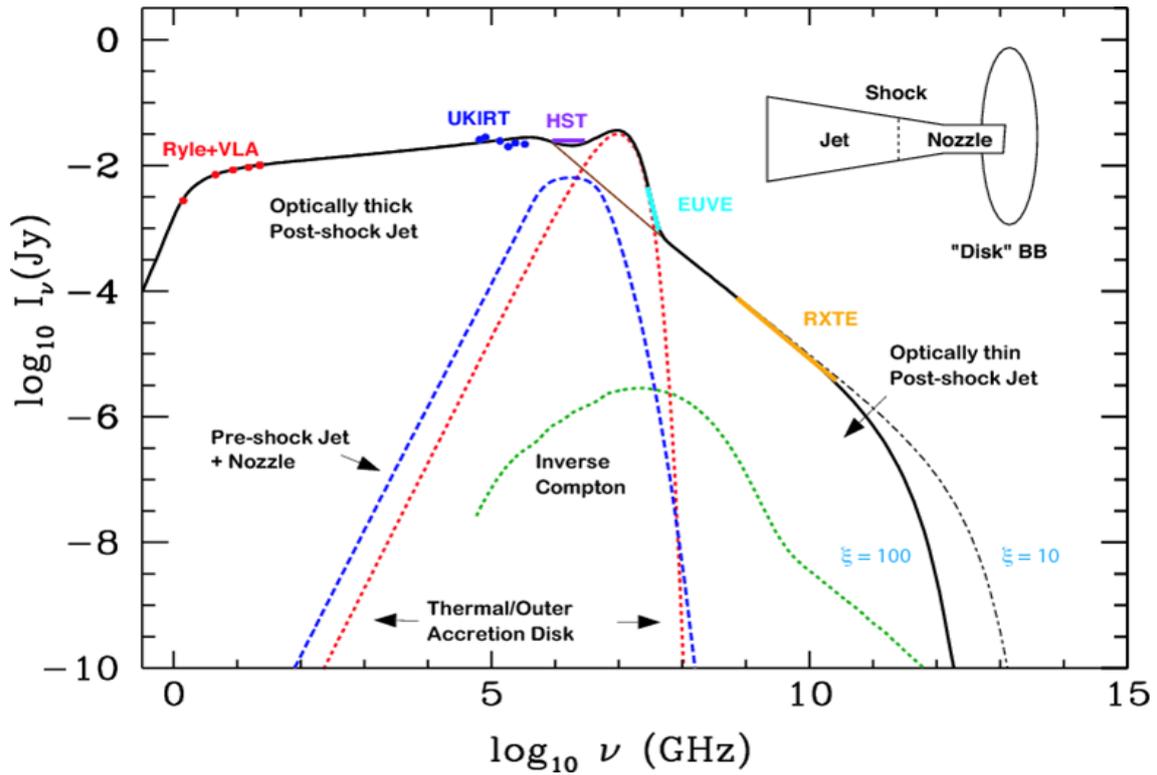


図 1.6: ブラックホール X 線連星 XTE J1118+480 の多波長スペクトル [7]

図 1.6 はブラックホール X 線連星 XTE J1118+480 の多波長の観測結果で、縦軸が光度、横軸が周波数を示しており赤点線で表されている降着円盤の熱放射成分と比べて、近赤外線～可視光域でのスペクトルの傾きが緩やかであることから、これをジェットのスィンクロトロン放射成分とみなしており、ジェットからの放射モデルを示したのが黒の実線となっている。彼らは紫外線域のごく一部を除き、ほぼ全ての周波数帯で放射はジェットからのものと提案している。

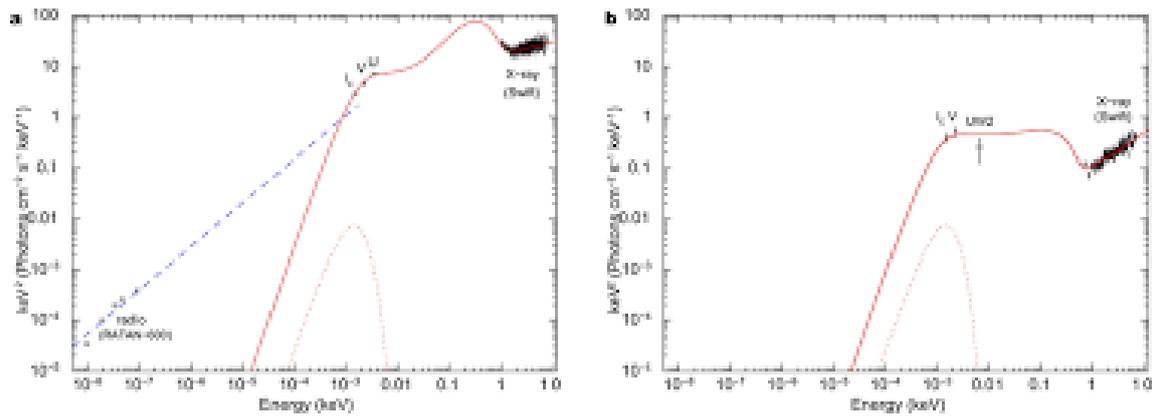


図 1.7: V404 Cyg の SED [8]

図 1.7 はブラックホール X 線連星 V404 Cyg の SED を示している。この観測でも可視光～近赤外線域は

スペクトルの傾きが緩やかだが、スペクトルの緩やかな傾きはジェットからのシンクロトロン放射でなくても、降着円盤の外縁付近が中心からの照射で縦方向に盛り上がるモデルでも再現できると報告している。したがって、スペクトルの傾きだけでは放射がジェットからのシンクロトロン放射か、降着円盤の熱放射かは判別できない。一方で、ジェットからのシンクロトロン放射は強く偏光しており、実際にブレーザーでは数十%の偏光度が観測されている。恒星や降着円盤の熱放射はほぼ偏光しないので、偏光を測ることでジェット放射の寄与を推定できる。

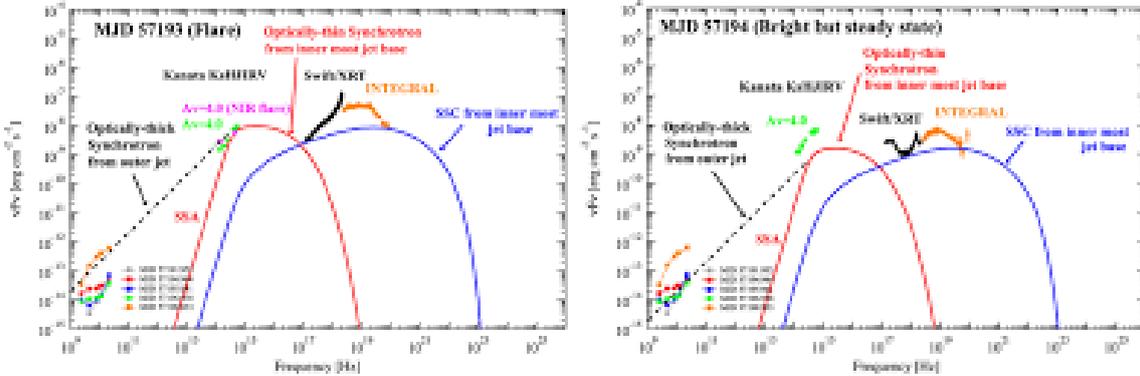


図 1.8: V404 Cyg の SED-2[9]

実際に V404 Cyg でも偏光の検出が試みられたが、有意な偏光は検出されなかった。図 1.8 は図 1.7 とは別の論文で V404 Cyg の SED を示している。V404 Cyg で偏光が検出されなかった、という観測結果からジェットの寄与に上限を与えて、ジェットの総パワーの上限を見積もっており、X 線連星ジェットの放射効率が活動銀河核ジェットのものと同等であること、その一方で、電子の最大エネルギーは活動銀河核ジェットよりも低いことを報告している。

これまで X 線連星の可視光-近赤外線観測で偏光まで含めて明確にジェットの寄与を示したものはまだない。一方で、銀河円盤内は星間偏光が強いため、天体固有の偏光と星間偏光を分離する必要があるが、星間偏光を正確に測定することは難しい。しかし、時間変動が激しい天体であれば、長い期間モニター観測することで、時間変動しない星間偏光成分と変動成分が分離でき、天体固有の偏光が検出できるかもしれない。長期間のモニター観測は小型望遠鏡が有効だが、小型望遠鏡では明るい天体でないと観測できない。ブラックホール X 線連星 GRS 1915+105 は明るさと激しい時間変動の点で良い観測対象である。

1.3 GRS1915+105

GRS 1915+105 は距離 12.5 kpc にある連星周期約 30 日、軌道傾斜角 66 度の LMXB ブラックホール X 線連星である。GRS 1915+105 は銀河中心方向に位置するため、天体からの可視光は銀河円盤内にある星間物質による吸収を強く受ける。一方で、近赤外線では星間吸収の影響は小さい。例えば I バンド (波長 800 nm 付近) では 23.4 等と暗いが、H バンド (波長 1.6 μ m 付近) K_s バンド (波長 2.2 μ m 付近) ではそれぞれ約 14 等、13 等と比較的明るい。GRS 1915+105 は重力と放射圧が釣り合う、いわゆる、エディントン光度付近で輝く、大光度の X 線連星であることが知られている。また、X 線では 10^{-1} 秒から 10^7 秒の幅広い時間スケールで激しく時間変動することも知られている。

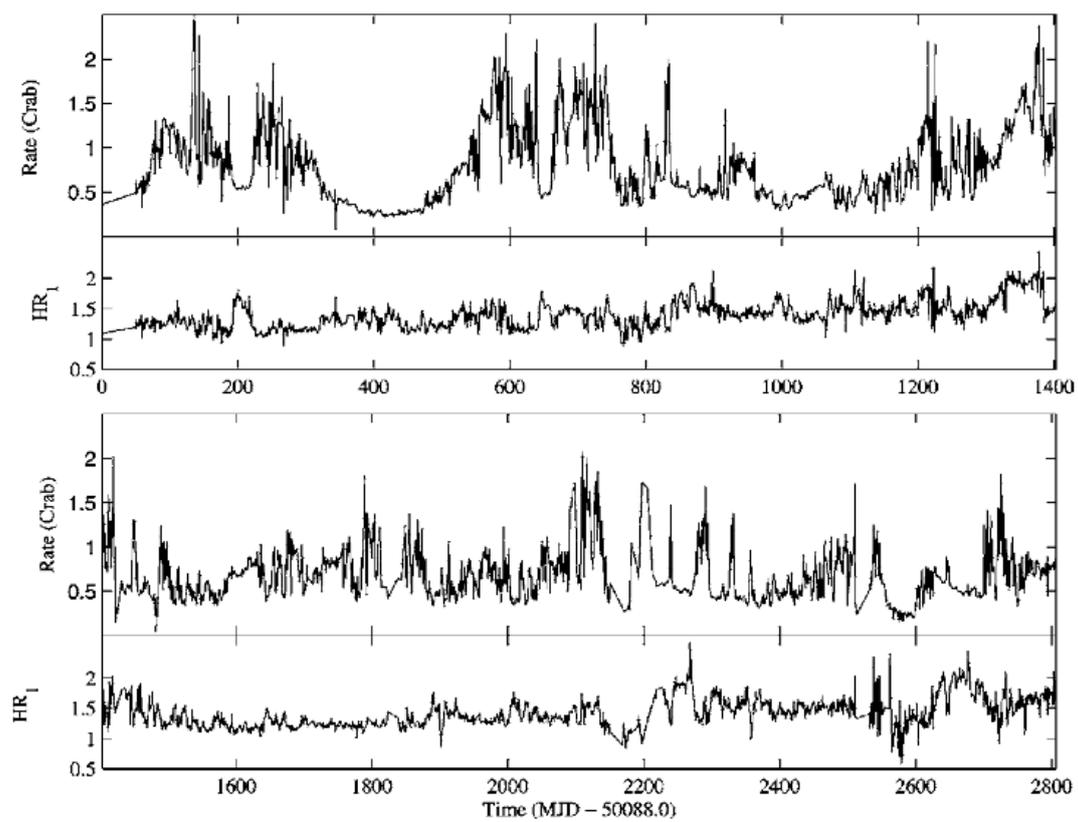


図 1.9: GRS 1915+105 の長時間 X 線光度変動 [10]

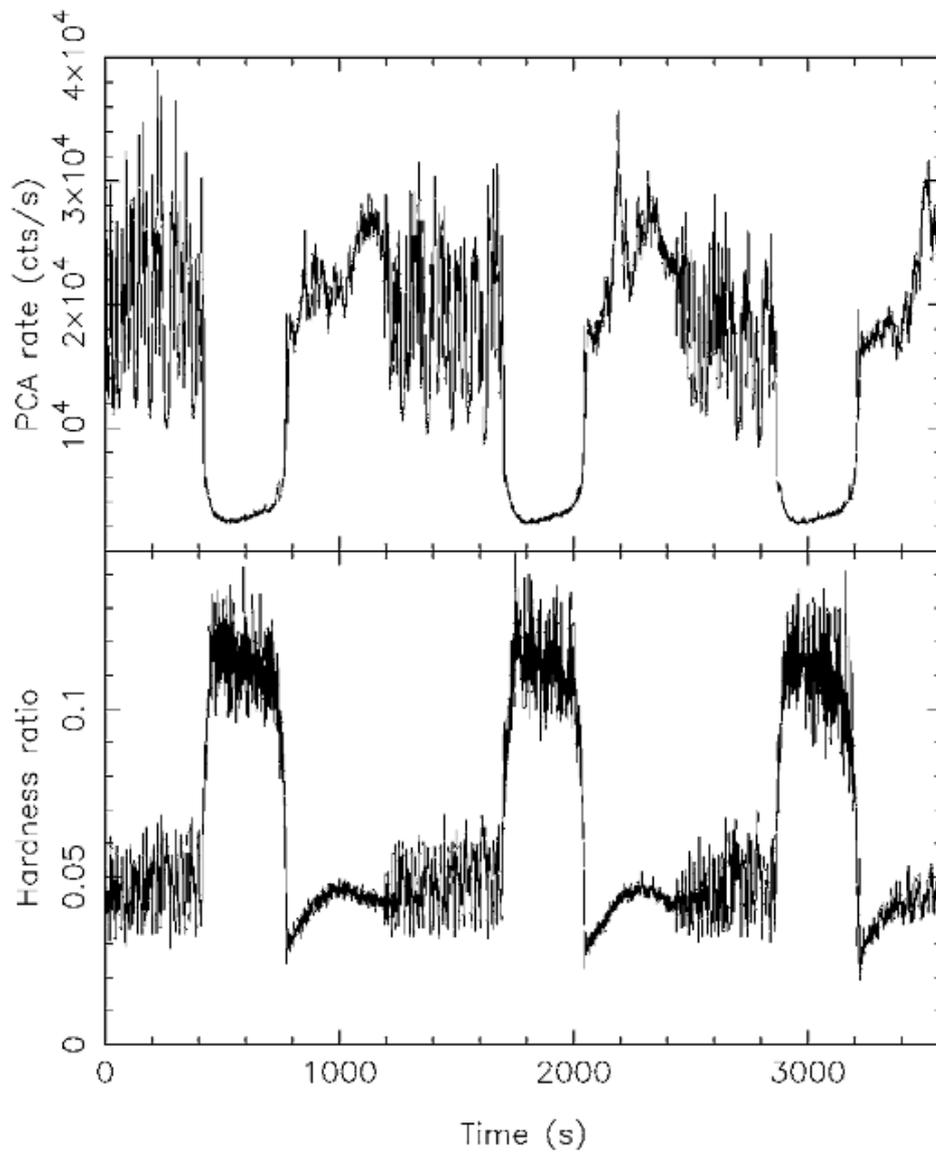


図 1.10: GRS 1915+105 の短時間 X 線光度変動 [10]

図 1.9 と図 1.10 は GRS 1915+105 の長時間と短時間の X 線光度変動を示している。このように長期においても短期において激しい変動が見られる。

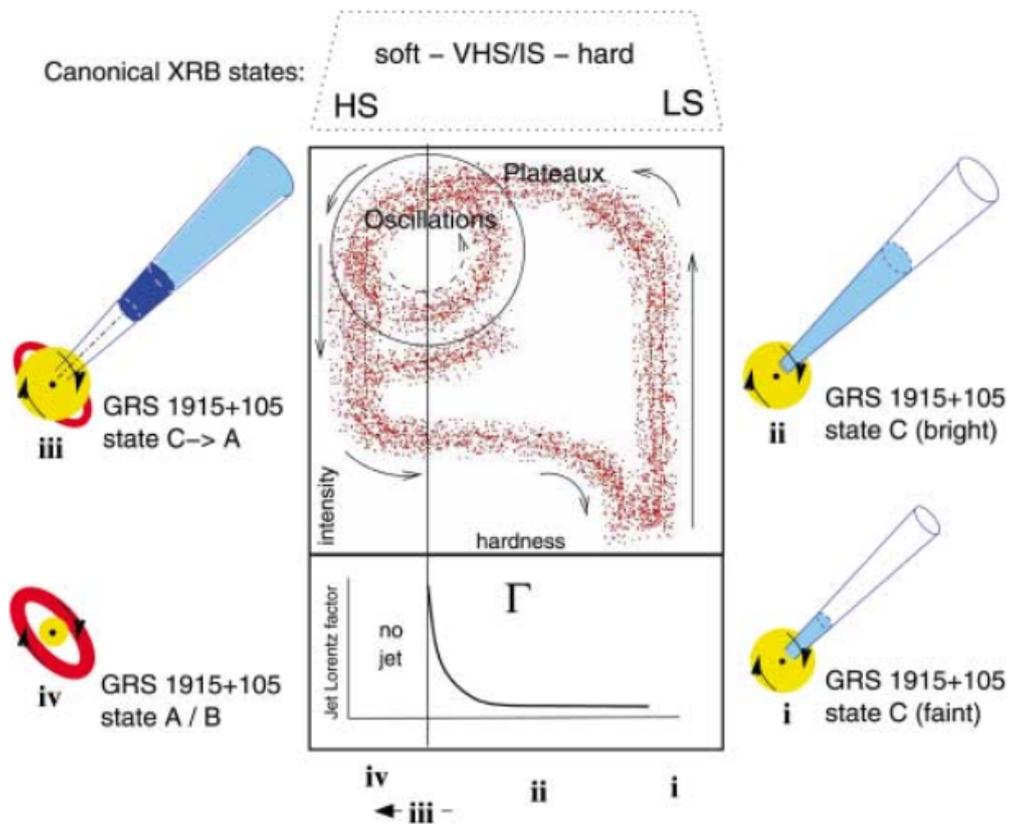


図 1.11: GRS 1915+105 の状態遷移 [10]

図 1.11 は GRS 1015+105 の X 線時間変動ごとに stage A, B, C の 3 つの状態に分類した図である。この論文の著者は stage C が定常的なジェットが出ている状態、stage C から A に遷移する時に間欠的なジェットがでる、と提案している。つまり GRS 1915+105 はジェット起源の放射の時間変動が期待できる天体である。

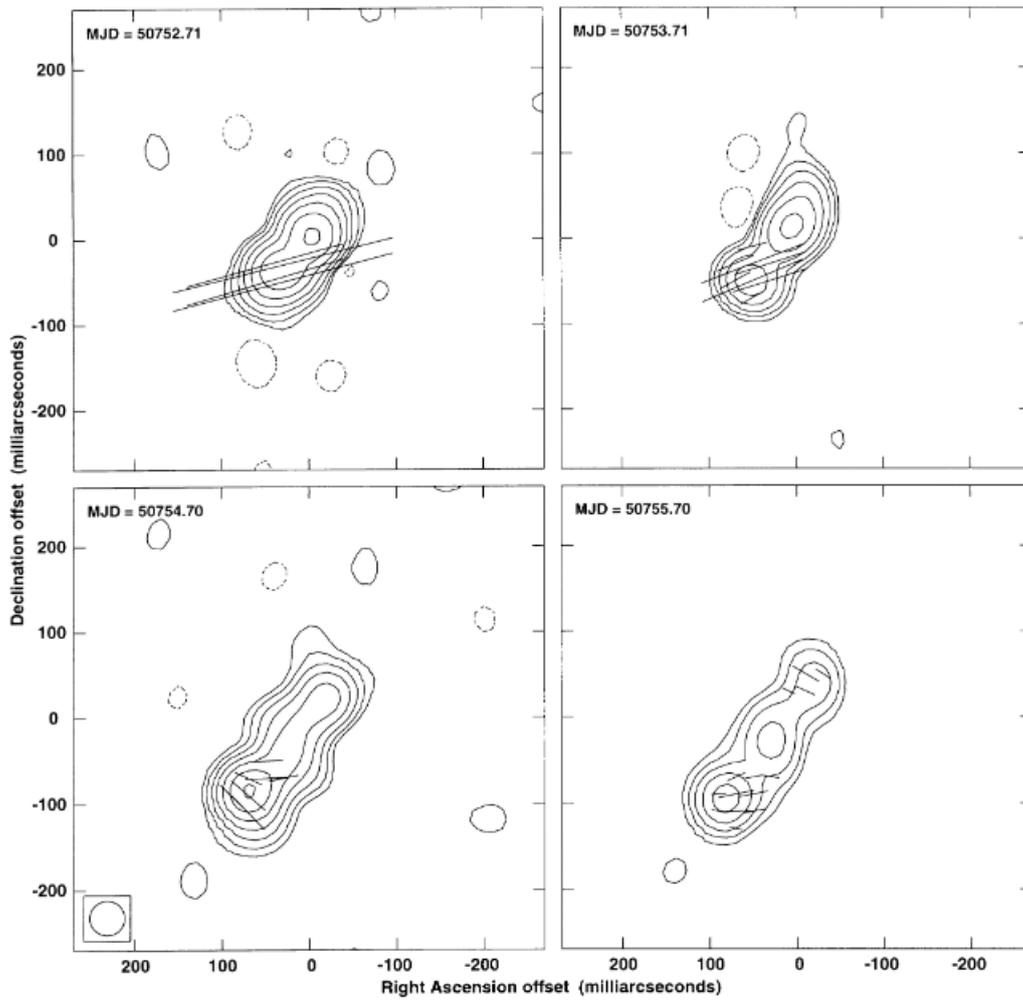


図 1.12: GRS 1915+105 の電波ジェットの方法 [6]

図 1.12 は GRS 1915+105 の電波ジェットが天球面上でどの方向に出ているかを示している。この図から実際ジェットは北から東回りに位置角 142 度の方角に出ていることがわかる。

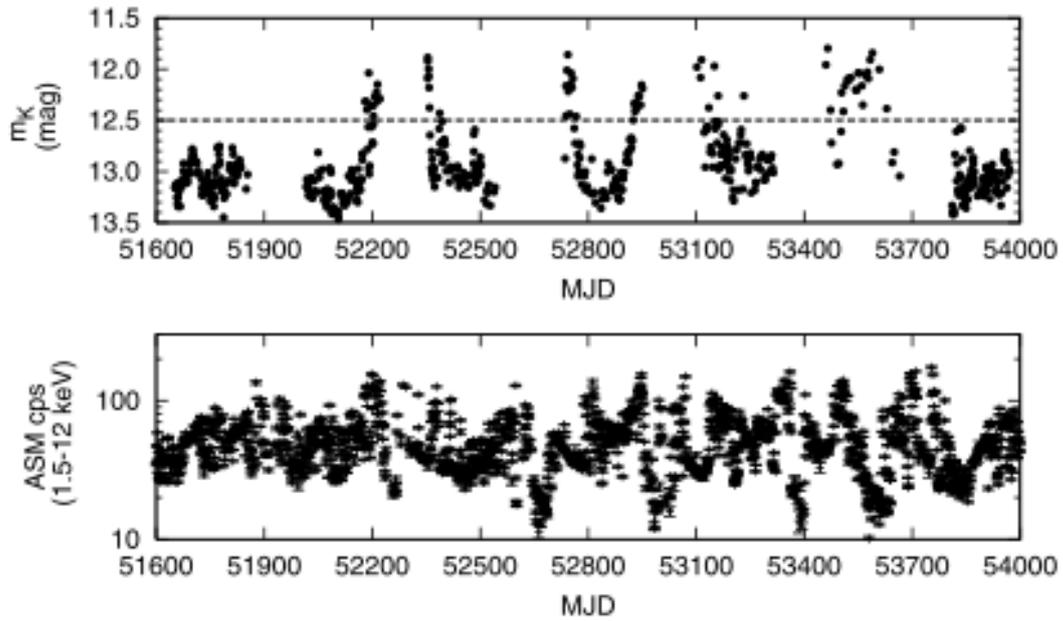


図 1.13: GRS 1915+105 K_s バンドの光度変動 [11]

図 1.13 は近赤外領域 (K_s バンド) での光度変動を示している。図 1.13 より、近赤外線では数百日に 1 回程度の頻度で 1 等級程度明るくなる。この増光は X 線光度、X 線のスペクトルの傾きと相関していると報告されている。また、近赤外線で暗い時期の解析から、伴星の公転に付随する周期 30.8 日の光度変動と、降着円盤に起因する周期 31—32 日の光度変動が検出されており、伴星と降着円盤からの放射が一定の寄与を持っていることがわかる。

また、本研究と同じくかなた望遠鏡で撮られた先行研究も紹介する。図 1.14 はかなた望遠鏡でとられた K-band での光度変動を示す。

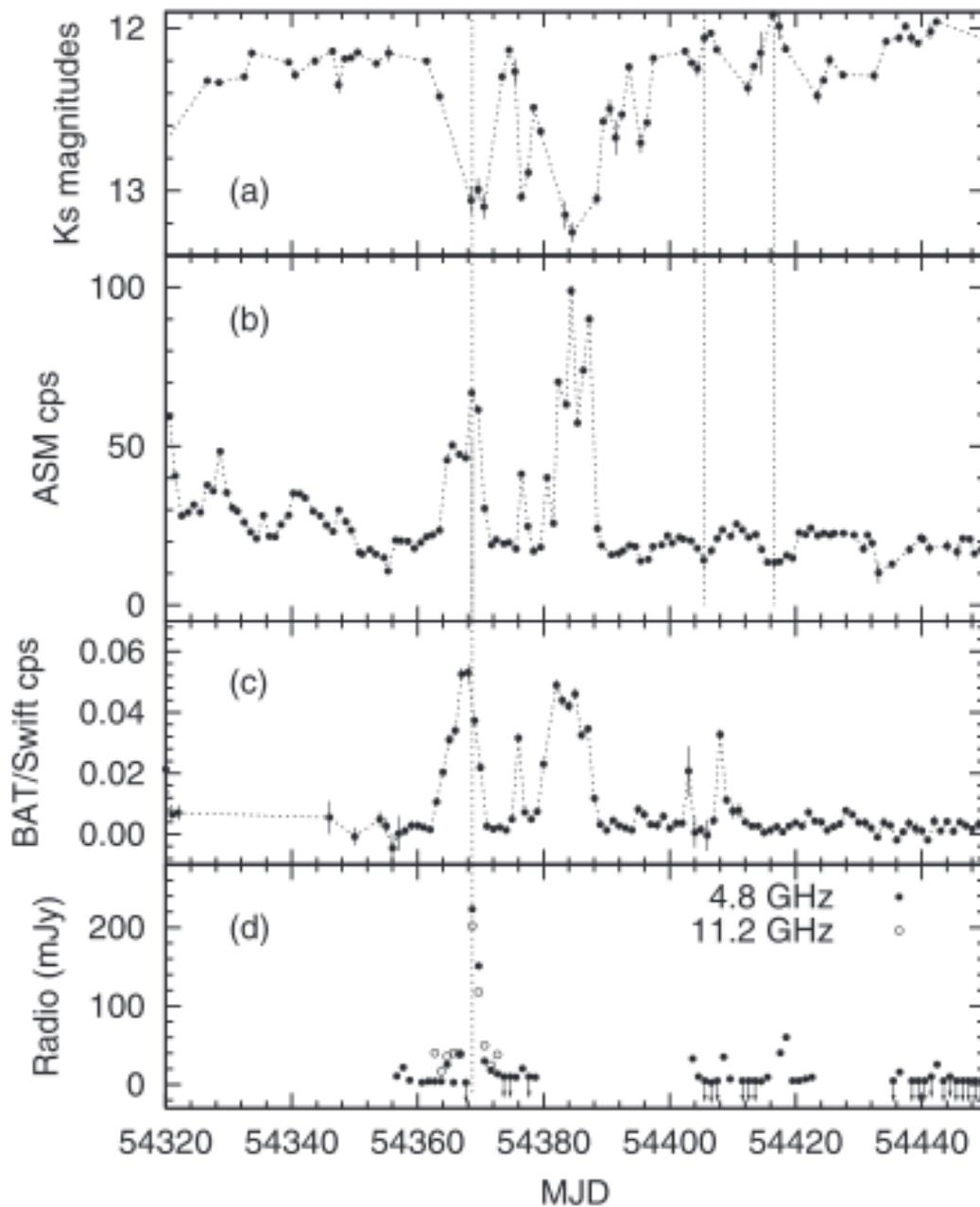


図 1.14: GRS 1915+105 K-バンドの光度変動 (かなた望遠鏡)[12]

X 線で低エネルギー領域が卓越している状態において、近赤外線では降着円盤が明るい状態が継続し、その状態から突発的に X 線で明るく、近赤外線では暗くなる時にジェットが出ていることがわかった。次に GRS 1915+105 の偏光観測の先行研究を紹介する。以下の図 1.15 は 2004 年に近赤外線での偏光観測が行われた時のグラフで縦軸が偏光度、横軸が周波数を示している。

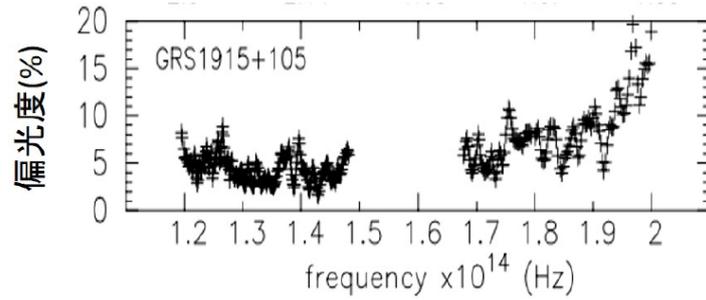


図 1.15: GRS1915+105 の赤外線領域の偏光度スペクトル [13]

図 1.15 から高周波数側ほど偏光度が高いことがわかるが、これは星間物質による吸収で生じる星間偏光の効果と一致する。したがって、このデータからは天体固有の偏光成分があるとは結論されなかった。

2014 年には広島大学かなた望遠鏡で GRS 1915+105 の近赤外線偏光観測が行われた。以下の図 1.16 は GRS1915+105 をかなた望遠鏡に取り付けられている観測装置 HONIR で 2014 年 5 月 30 日、7 月 23 日に H バンドで偏光観測を実施した時の測定結果を QU 平面上に示している。

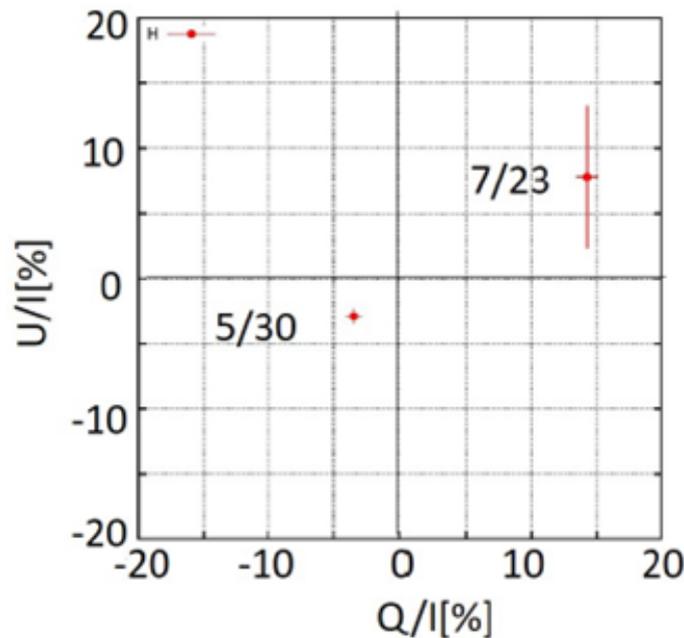


図 1.16: GRS1915+105 の偏光パラメータ $Q/I, U/I$ [14]

この図から、少なくとも 2 回の測定では偏光パラメータが有意に異なり、時間変動している可能性が示唆される。一方で、この領域では数%の星間偏光が期待されるため、星間偏光成分の差し引きが重要となる。次に、星間偏光成分を推定するため、GRS 1915+105 を中心に 10 度の範囲にある周囲の恒星の偏光を示した図を図 1.17 に示す。この図では原点に GRS1915+105 があり、直球の傾きが偏光方位角、長さが偏

光度をを表している。また赤線が5月30日、青線が7月23日のデータを示している。

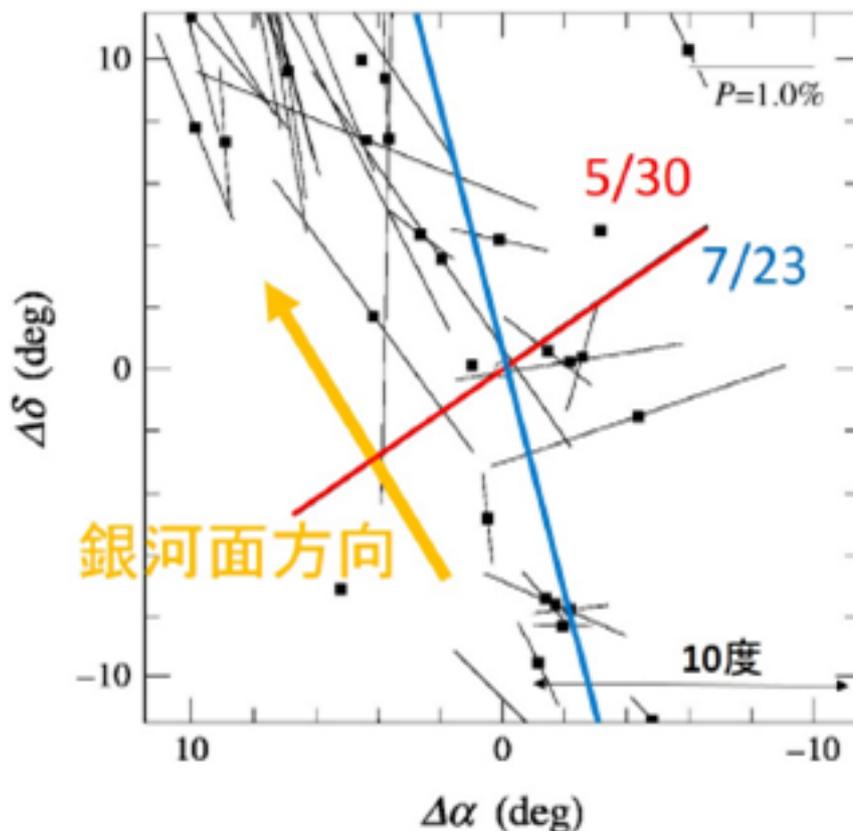


図 1.17: GRS1915+105 の偏光マップ [14]

しかしながら、図 1.17 の偏光マップには恒星までの距離を考慮せず全てのサンプルを表示しているため、銀河などにより偏光を受けた遠方天体が比較的影響を受けていない近傍天体が判断できない。従って、距離の依存性を調べるために周辺天体を距離で 2 つに分けて同様の検証が行われた。図 1.18 は天体から 0.05 度の範囲とより狭い位置に存在する天体を見ており、図 1.18 を見てわかるように、周辺天体の偏光の向きや大きさに特定の偏りは見られなかった。そのため、得られた偏光が星間偏光によるものか天体固有のものかは結論できなかった。一方で、二回の観測で変動の兆候が見られるため、データ点を増やすことで GRS1915+105 の偏光が星間偏光か天体固有か判断することが可能であると考えられる。

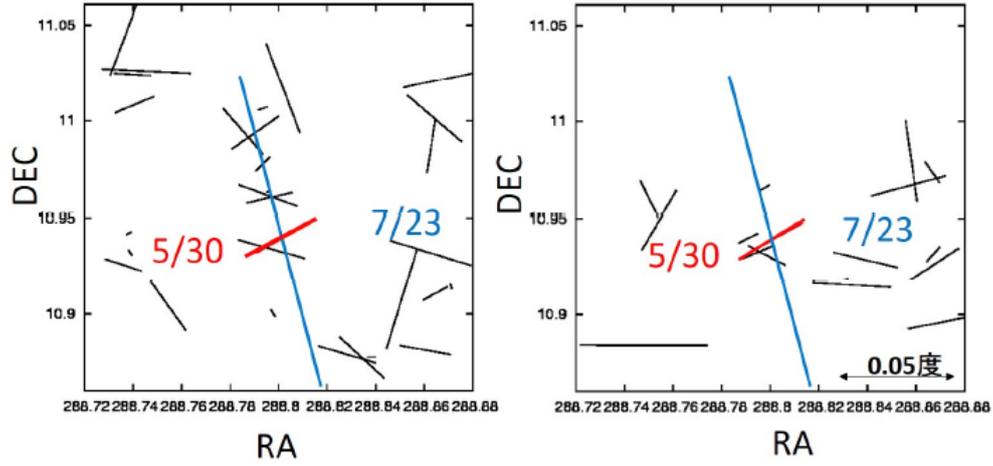


図 1.18: GRS1915+105 の近傍の偏光マップ [14]

1.4 本研究の目的

本研究では GRS 1915+105 の偏光モニター観測を行い、偏光パラメータの時間変動を検出することを目的とする。前述の通り、GRS 1915+105 はブラックホール X 線連星の中でも小型望遠鏡でも観測できるほど明るい貴重な天体であり、また、ジェットの生成を伴う激しい時間変動が観測される。これらは偏光の時間変動からジェットの放射成分を推定する本課題に必要な特徴である。

次章では観測およびデータ解析の詳細を述べる。第 3 章では測定結果を報告し、第 4 章では本観測による結果と X 線データを比較して、得られる示唆について議論する。第 5 章では本論文の結論をまとめる。

第2章 データ解析

本章では使用した望遠鏡と観測装置を紹介したのち、実際に行った観測の詳細を述べ、最後にデータ解析の内容を記す。

2.1 観測装置



図 2.1: 東広島天文台 [15]

このセクションでは今回観測で用いたかなた望遠鏡について概要を紹介する。まずかなた望遠鏡とは、2006年から広島大学が運用している東広島天文台に設置された反射型望遠鏡である。図 2.1 は東広島天文台の全景である。かなた望遠鏡の主鏡の直径は 1.5m あり、大学が国内に所有する望遠鏡では四番目の主鏡の大きさを持っている。またかなた望遠鏡を用いて、超新星や活動銀河核、ガンマ線バーストの観測が活動的に行われてきた。現在では重力波天体のフォローアップ観測も行なっている。このような観測が可能であるのは、かなた望遠鏡の機動性が優れているからであり、方位 $5^\circ/\text{sec}$ 、光度 $2^\circ/\text{sec}$ という 1.5m 望遠鏡の中で世界最速の駆動速度を持つ。かなた望遠鏡には、2011 年まで TRISPEC、現在は HOWPOL、HONIR、高速カメラという観測装置が設置されており、可視から近赤外線までの観測が可能である。以下の表 2.1 にかなた望遠鏡の詳細を載せた。

かなた望遠鏡のカメラの 1 つ HONIR(可視赤外線同時カメラ) を説明する。HONIR は可視 1 バンド、近赤外線 1 バンドで同時に撮ることができるカメラでカセグレン焦点に搭載されている。以下の図 2.2 に全体像を示す。

光学系	Ritchey-Chretien 光学系
主鏡	有効径 1,540 mm / 主鏡 F 比=2.0
焦点モード	カセグレン焦点 (F/12.2) ナスミス焦点 (F/12.2)
焦点面スケール	カセグレン 11.25 秒角/mm ナスミス 11.25 秒角/mm
視野	直径 15 分角
分解能	1 " FWHM
架台	経緯台 最大角速度 方位軸まわり 5 度/秒 高度軸まわり 2 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 1,000kg

表 2.1: かなた望遠鏡の性能



図 2.2: HONIR[15]
20

また、HONIR の性能について以下の表 2.2 に示す。HONIR は撮像、分光、偏光撮像、偏光分光モード

項目	opt(可視)	IR(赤外線)
波長 [μ m]	0.4-1.0	1.15 - 2.4
フィルタ-	B, V, Rc, Ic, Y	Y, J, H, Ks
視野	10 × 10	10 × 10
検出器	CCD	HgCdTe(VIRGO)
検出器のピクセル数	2048 × 4096	2048 × 2048
ピクセルサイズ [秒/pix]	0.294	0.295
検出器サイズ [mm]	30.72 × 61.44	40.96 × 40.96

表 2.2: HONIR の性能

がありそれぞれの目的にあった観測が可能である。私の今回の研究対象である目的天体 GRS1915+105 に関しても、HONIR の偏光撮像モードで観測を行った。

2.2 画像の一次処理

かなた望遠鏡 (HONIR) から得られた生データに対して一次処理を行った。以下にどのような一次処理をしたかを示す。

1. バイアス信号の除去

得られる画像には、ノイズのためにマイナスのカウント値がでないよう、電気的に出力値をかさ上げする「バイアス信号」が足されている。バイアス引きとは、データ取得時に得られたバイアス信号を観測画像から差し引くことである。

2. フラット補正

フラットフレームと呼ばれる、全視野にわたって一様な輝度の入射光を撮った校正用画像を用いて、画像に生じた周辺の減光やピクセル毎の感度差を補正する処理のことを、フラット補正と呼ぶ。天体写真に発生し易い周辺減光を補正でき、CCD の感度ムラとケラレを除くことができる。

3. スカイ引き

天体が写っていない領域から背景光を推定し、データから差し引く。また、これらの一次処理をチュートリアル [16] に従って操作を行った。

2.3 測光

一次処理された画像から、恒星の明るさを測定する解析は「測光」と呼ばれる。測光には一般的に 2 種類ある。その 2 種類を紹介する。

2.3.1 アパーチャ測光と PSF 測光

1. アパーチャー測光

アパーチャー測光とは、星の重心から適当な開口半径までのフラックスの総和を計算し、周囲の領域から背景光成分を内挿して推定し、背景光を差し引く測光方法である。しかし、いりこんだ混雑している星を測定したいときには背景光の推定が周りの星に影響される影響されるためこの測光方法は向いていない。

2. Point spread function (PSF) 測光

視野内の明るい星を使って Point spread function(PSF) モデルを構築し、目的の星に当てはめて測光する方法を PSF 測光という。星がいりこんで、混雑したときによく用いられる測光方法である。今回の目的天体はとても星が入り組んだところにあるため、PSF 測光で測光した。図 2.3 は GRS 1915+105 とその周辺の写真である。赤丸で示された天体が本研究対象天体である。この画像からわかるように、この天体の近傍に天体が存在していることがわかる。

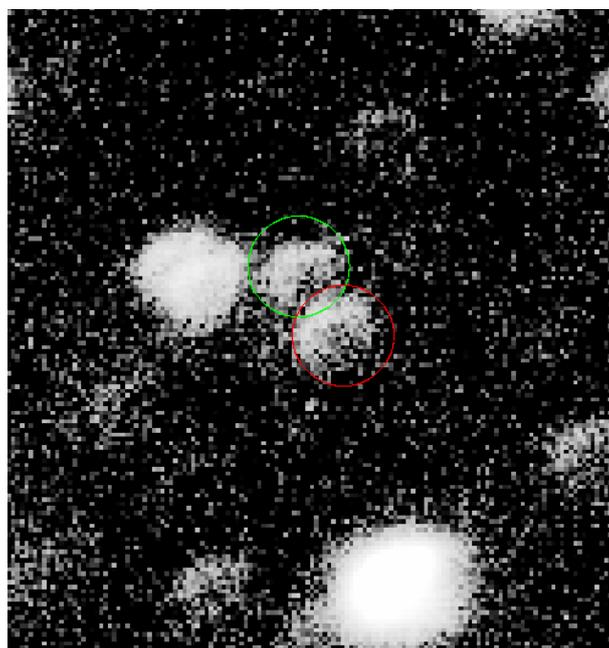


図 2.3: 本研究対象天体

2.3.2 相対測光

天体光は地球大気による吸収を受け、その吸収量を補正しないと正しい天体の明るさが測光できない。大気吸収は天候などによって時間と共に変わるため、予め推定することはできない。そこで、狭い視野内では共通の大気吸収量であると考え、目的天体の近くにある明るさが既知の天体と、目的天体の等級差を計算することで、大気吸収を補正する手法を相対測光という。真の等級は以下の数式と 2MASS カタログでの等級を用いて計算をした。比較星の情報は表 2.3 に記す。

PSF 測光によって得られる等級 m は、真の等級 m_0 から大気吸収 m_a 、機械的な等級の原点 C を用いて、

赤経	19 15 11.327
赤緯	+10 56 27.43
H バンド等級	10.413
等級の誤差	0.027

表 2.3: 比較星の情報 [18]

$$m = m_0 + m_a + C$$

と書ける。このうち、 m_a と C は狭い視野内では同じだと考えて、目的天体の機械等級を m_{obj} , 比較星の機械等級を m_c として、

$$m_{obj} - m_c = m_{0obj} - m_{0c}$$

となる。ここで、比較星の本来の等級 m_{0c} が既知なら、

$$m_{0obj} = m_{obj} - m_c + m_{0c}$$

として、 m_{obj} が計算できる。

2.4 偏光パラメータの導出

光は電場と磁場が互いに直交しながら伝わる波であり、電場が振動している向きを偏光方向と呼ぶ。また、電場ベクトルと光の伝播ベクトルの作る平面の分布によって光は偏光とそうでない光とに分けられる。様々な振動面が混ざり合っている光は自然光であり、振動面が特定の方向に偏って光は偏光した光となる。Z 方向に進行する電磁波の振動数を ν 、X 方向、Y 方向の振動をそれぞれ E_x, E_y 、X 方向と Y 方向の波の位相差を δ とすると、一般に電磁波の電場は以下のように表される。

$$E_x = \epsilon_x(t) \cos(2\pi\nu t), E_y = \epsilon_y(t) \cos(2\pi\nu t + \delta) \quad (2.1)$$

位相差 δ がないか、 E_x, E_y が 0 の時、直線偏光であり、位相差が $\pm 90^\circ$ の時は円偏光である。それ以外では楕円偏光となる。偏光について述べる際に重要となるストークスパラメータとは 1852 年にストークスが導入した 4 つの値 (I, Q, U, V) である。偏光とはベクトルであり、計算するにはベクトル的に扱う必要があるが、このストークスパラメータは加算性があり、計算が容易にできる。ある値 a の時間平均 $\langle a \rangle$ と定義すると、それぞれのパラメータは以下のように書ける。

$$I = \langle \epsilon_x^2 \rangle + \langle \epsilon_y^2 \rangle$$

$$Q = \langle \epsilon_x^2 \rangle - \langle \epsilon_y^2 \rangle$$

$$U = 2 \langle \epsilon_x \epsilon_y \cos \delta \rangle$$

$$V = 2 \langle \epsilon_x \epsilon_y \sin \delta \rangle$$

ここで、 I は総光量、 Q,U は直線偏光、 V は円偏光に関するパラメーターである。TRISPEC,HOWPol,HONIRでは、観測できるのが直線偏光のみとなるので、以降は直線偏光について述べる。円偏光は非常に小さいことが知られており、ここでは $V = 0$ とする。これらのパラメーターを用いて偏光度 P と偏光方位角 θ は以下のように表せる。

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (2.2)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (2.3)$$

実際に、天体の光を観測し、どのようにストークスパラメーターを測定するのかを以下で説明する。図2.4は、天体からの光がウォラストンプリズムに入射し、そこで分割される様子を表している。

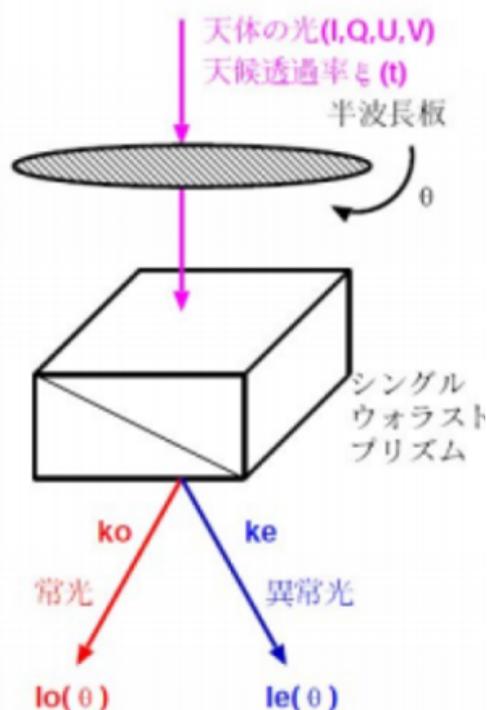


図 2.4: 偏光観測 [17]

天体からの光は大気である程度吸収される。この吸収量を t とおく。その後、光は望遠鏡に入り、角度 θ だけ回転した半波長板を通過し、ウォラストンプリズムに入った時に常光と異常光に分けられる。プリズムによって分けられた光は、ある効率 k_o, k_e で減光される。HONIRの通常の偏光観測では半波長板を入れて偏光データを取得する。半波長板は直線偏光の偏光方位を回転させることが可能である。波長板の光学軸が入射光の偏光方位と一致している場合、偏光方位は変わらず出射する。また、半波長板を回転させることにより、自由に直線偏光の偏光方位を変化させることが可能である。その際、光量は変化しないことも半波長板の特徴である。これにより、半波長板を回すことで、それ以降の装置全体を回すことと等価な操

作をすることができる。そうすることで、ある効率 k_o, k_e を消去して偏光パラメータを導出することができる。以下に数式を用いて記す。

まず、検出器で検出される光の強度 $I_o(\theta), I_e(\theta)$ は以下のように書くことができる

$$I_o(\theta) = \frac{I}{2} \left(1 + \frac{Q}{I} \cos 4\theta + \frac{U}{I} \sin 4\theta \right) k_o \xi(t) \quad (2.4)$$

$$I_e(\theta) = \frac{I}{2} \left(1 - \frac{Q}{I} \cos 4\theta - \frac{U}{I} \sin 4\theta \right) k_e \xi(t) \quad (2.5)$$

ここで、半波長板の角度 θ は 0, 22.5, 45, 67.5 で観測するので、それぞれの光の強度は以下ようになる。

$$I_o(0) = \frac{I}{2} \left(1 + \frac{Q}{I} \right) k_o \xi(t_0)$$

$$I_e(0) = \frac{I}{2} \left(1 - \frac{Q}{I} \right) k_e \xi(t_0)$$

$$I_o(22.5) = \frac{I}{2} \left(1 + \frac{U}{I} \right) k_o \xi(t_{22.5})$$

$$I_e(22.5) = \frac{I}{2} \left(1 - \frac{U}{I} \right) k_e \xi(t_{22.5})$$

$$I_o(45) = \frac{I}{2} \left(1 + \frac{Q}{I} \right) k_o \xi(t_{45})$$

$$I_e(45) = \frac{I}{2} \left(1 - \frac{Q}{I} \right) k_e \xi(t_{45})$$

$$I_o(67.5) = \frac{I}{2} \left(1 + \frac{U}{I} \right) k_o \xi(t_{67.5})$$

$$I_e(67.5) = \frac{I}{2} \left(1 - \frac{U}{I} \right) k_e \xi(t_{67.5})$$

0, 45 の式、22.5, 67.5 の式からそれぞれ k_o, k_e を打ち消す。

$$\frac{I_e(0)}{I_o(0)} = \left(\frac{1 - Q/I}{1 + Q/I} \right) \frac{k_e}{k_o}$$

$$\frac{I_e(45)}{I_o(45)} = \left(\frac{1 + Q/I}{1 - Q/I} \right) \frac{k_e}{k_o}$$

$$\frac{I_e(22.5)}{I_o(22.5)} = \left(\frac{1 - U/I}{1 + U/I} \right) \frac{k_e}{k_o}$$

$$\frac{I_e(67.5)}{I_o(67.5)} = \left(\frac{1 + U/I}{1 - U/I} \right) \frac{k_e}{k_o}$$

ここで、

$$a_1 = \sqrt{\frac{I_e(0)/I_o(0)}{I_e(45)/I_o(45)}}$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{I_e(22.5)/I_o(22.5)}{I_e(67.5)/I_o(67.5)}}$$

と、 a_1, a_2 をおくと、

$$a_1 = \frac{1 - Q/I}{1 + Q/I}$$

$$a_2 = \frac{1 - U/I}{1 + U/I}$$

と表すことができる。これより光度とストークスパラメーターは以下のように求めることができる。

$$I = \sum_{\theta} (I_o(\theta) + I_e(\theta)) \quad (2.6)$$

$$\frac{Q}{I} = \frac{1 - a_1}{1 + a_1} \quad (2.7)$$

$$\frac{U}{I} = \frac{1 - a_2}{1 + a_2} \quad (2.8)$$

式 2.2,2.7,2.8 より 4 つの角度で測定することで、ストークスパラメーター Q, U , 偏光度 P を大気の影響やプリズムによる減光 k_o, k_e に関係なく求めることができる。

2.5 観測ログ

本研究対象天体の観測ログについて以下の表 2.4 にまとめた。観測は 2016 年 8 月から 11 月までの 10 回実施した。このうち、9 月 2 日と 11 月 1 日は観測途中で天候が悪化し、偏光パラメータの測定はできなかったが、測光結果から等級だけ得られた。したがって、偏光パラメータは 8 点、等級データは 10 点、それぞれ取得に成功した。

日付	積分時間	枚数 (0,22.5,45,67.5)	バンド
2016/08/21 24:18-24:26	100[s]	各種一枚	H
2016/08/31 14:16-23:22	100[s]	各種一枚	H
2016/09/02 23:56-15:04 ¹	100[s]	0,22.5,45 一枚ずつ	H
2016/09/09 23:32-23:40	100[s]	各種一枚	H
2016/10/09 11:14-11:21	100[s]	各種一枚	H
2016/10/14 18:43-18:51	100[s]	各種一枚	H
2016/11/01 20:03-20:11 ¹	100[s]	0,22.5,45 一枚ずつ	H
2016/11/02 20:06-20:13	100[s]	各種一枚	H
2016/11/04 19:58-20:07	100[s]	各種一枚	H
2016/11/05 20:09-20:16	100[s]	各種一枚	H

表 2.4: 観測ログ

¹等級のみ求めた

第3章 結果

3.1 GRS 1915+105 の光度変動

図 3.1 は GRS 1915+105 の光度変動を示している。図 3.1 より、約 13 等級から 15 等級の間で変動していることがわかった。この結果は、図 3.2 に示す、2008 年と 2009 年でかなた望遠鏡で撮られた時間変動の特徴に似ている。

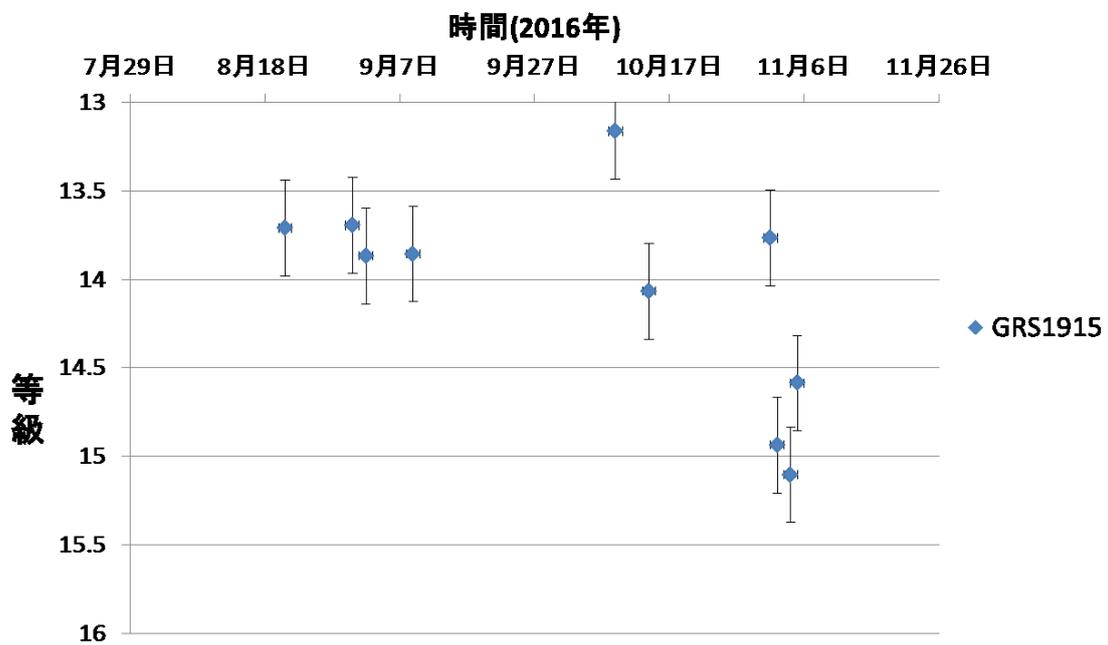


図 3.1: GRS 1915+105 の光度変動

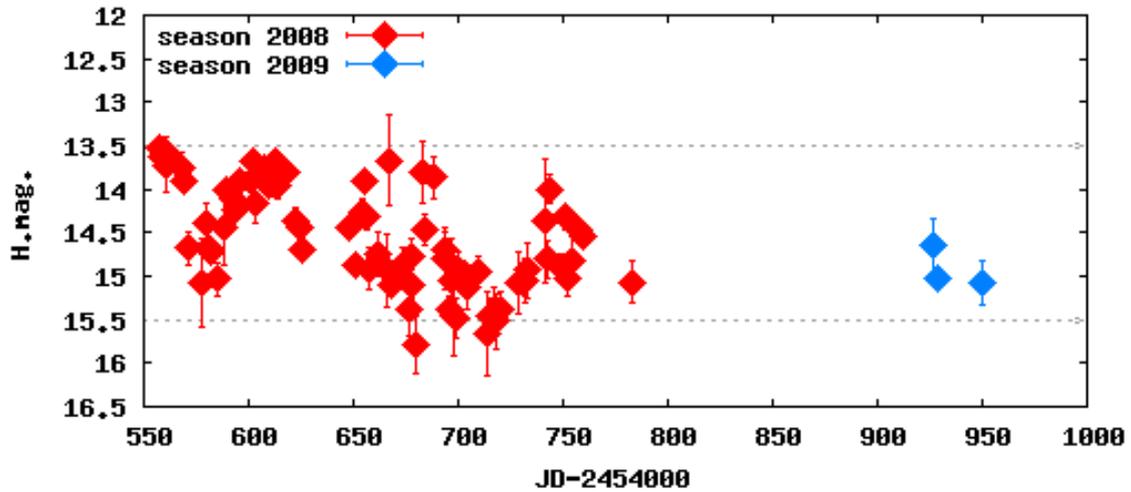


図 3.2: GRS 1915+105 の光度変動 (2008 年と 2009 年)[19]

3.2 GRS 1915+105 の偏光パラメータ

図 3.3 は GRS 1915+105 の偏光パラメータ QU を示した図である。縦軸が偏光パラメータ U 、横軸が偏光パラメータ Q で示している。式 2.2, 2.3 からわかるように、図 3.3 の原点からの距離が偏光度を示し横軸からの方位角が偏光方位角を示している。また、本天体に加えて周辺の星 A、B、C についても同様の解析を行った。図 3.3 より、明らかに周辺の星と比べて高い偏光度を示す時期があることがわかった。また、高い偏光度を示している点の内一点は 2014 年 7 月 23 日にかた望遠鏡で撮られたものと偏光方位角がほとんど同じ位置になった (図 1.16 の一点 $Q/I = 14.3 \pm 0.8$ [%]、 $U/I = 7.8 \pm 5.4$ [%])。また、図 1.12 からわかる電波ジェット方位角 142 度と近い偏光方位角、高い偏光度を示す点が 1 点存在する。周辺の星 A、B、C は結果の信頼性を確かめ、星間偏光成分を推定するために測定した。星 A、B、C はそれぞれ H バンド等級が 13.68、12.41、10.41 等である。それぞれの星の Q/I 、 U/I の平均及び標準偏差を表 3.1 にまとめる。

星	Q/I 平均値	U/I 平均値	Q/I 標準偏差	U/I 標準偏差
GRS 1915+105	2.5	0.5	7.6	9.7
A	0.4	-0.86	0.7	1.6
B	0.1	-0.4	0.6	0.6
C	0.01	-2.8	1.1	1.3

表 3.1: 各星のストークスパラメータ $Q/I, U/I$ の平均と標準偏差

図からもわかるように、星 A、B、C はいずれもそれぞれの平均値付近に分布し、GRS 1915+105 のような偏光度 5% を超える大きな時間変動は検出されていない。また、星 A は GRS 1915+105 と同程度の明るさの星であり、星 A が時間変動していないとすると、その Q/I 、 U/I の標準偏差が GRS 1915+105 の不定

性の指標と考えられる。これらのことは、画像処理、測光、及び偏光パラメータの導出の過程の正当性を示唆し、GRS 1915+105 や星 A, B, C の測定が正しく行われたことを表すと同時に、GRS 1915+105 の偏光の変化が有意であることを支持する。また、 QU の平均値はいずれも $(Q/I, U/I) \sim (0.3, -1.0)$ 付近であり、この偏光成分が星間偏光と考えられる。GRS 1915+105 の偏光度が小さい状態もこの星間偏光と同様の偏光方位角を持っており、星間偏光成分が寄与している可能性が高い。

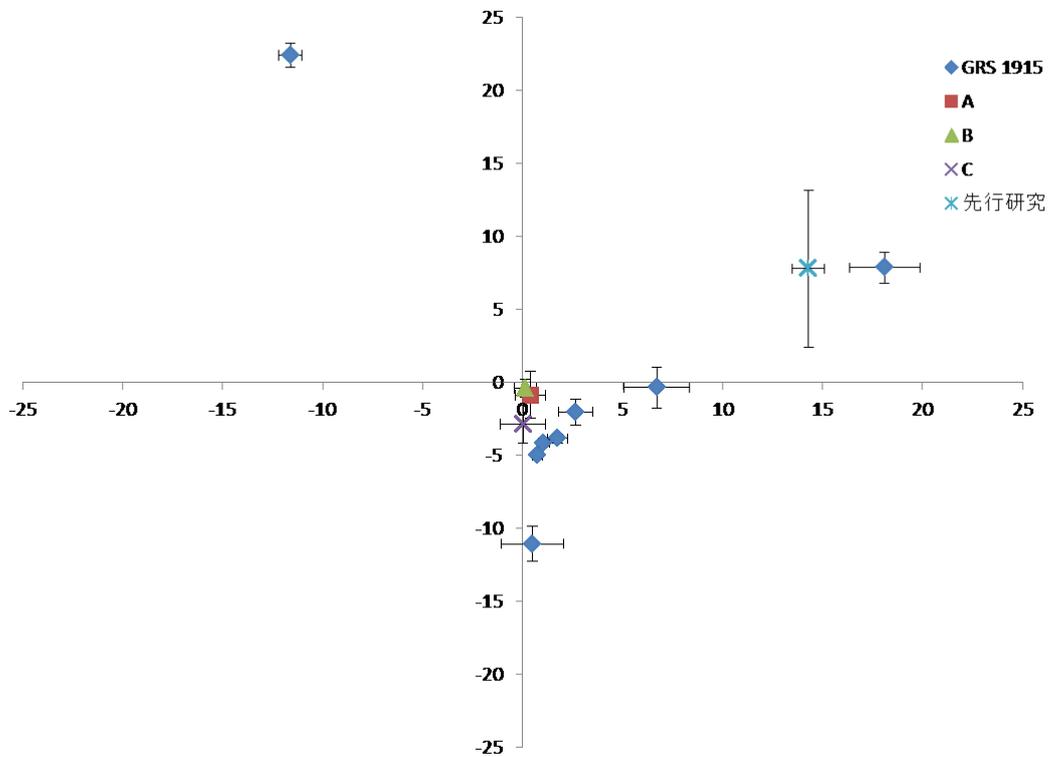


図 3.3: GRS 1915+105 の偏光パラメータ ($Q/I, U/I$)

図 3.4 は偏光度の時間変化を示したグラフである。この図より偏光度は 3.34–25.23 % の間で変動していることがわかる。図 3.1 と比較すると、天体が最も明るい時、偏光度が最も高くなることがわかった。

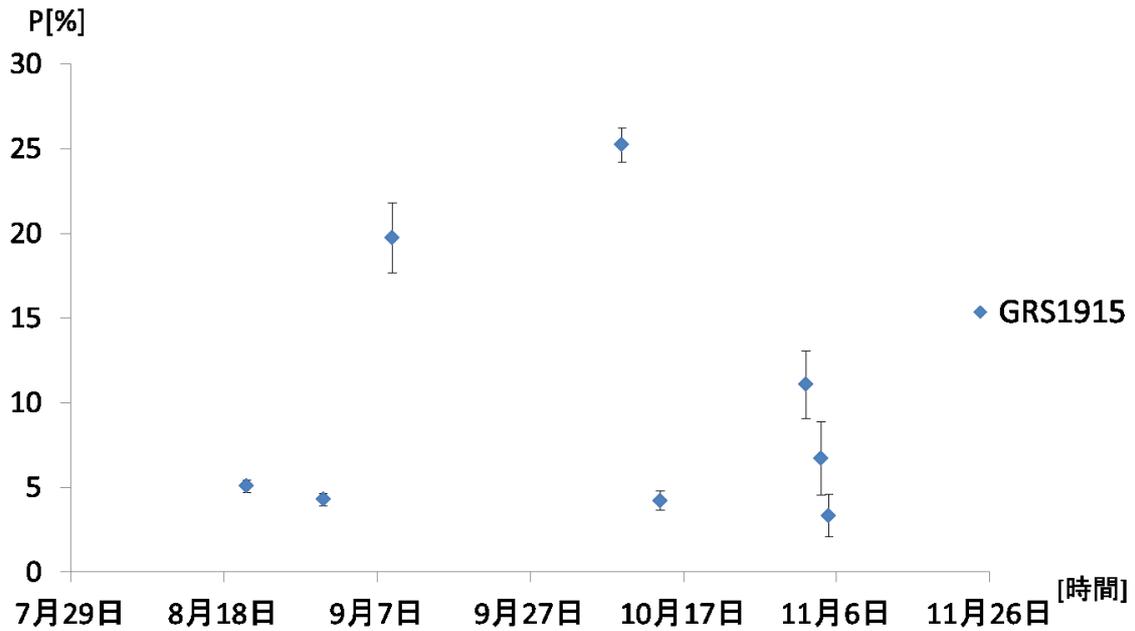


図 3.4: 偏光度の時間変動

図 3.5 は時間と偏光方位角 ($-90 \leq \text{deg} \leq 90$) の関係を示している。偏光方位角はいくつかの例外を除いて、 -20 — -40 度の間に集中している。図 3.3 からわかるように、この偏光方位角は星間偏光成分の偏光方位角である。また、系統的な偏光方位角の回転などは見られなかった。

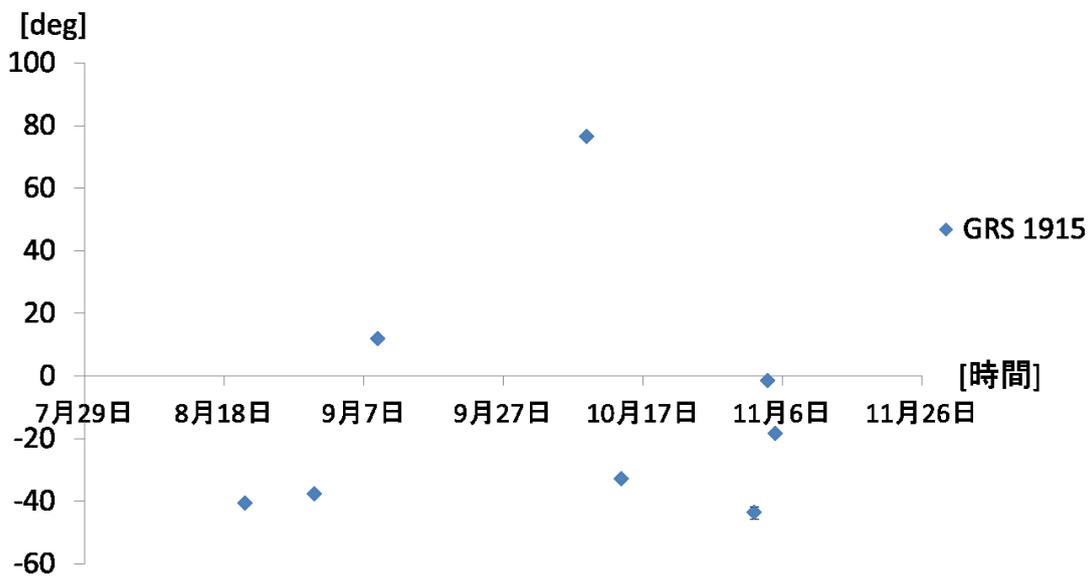


図 3.5: 偏光方位角の時間変化

第4章 考察

4.1 近赤外等級と偏光度の関係

図 4.1 は GRS 1915+105 の H バンド等級を縦軸、偏光度を横軸にしたグラフである。この図から、近赤外光度とその偏光度の間に単純な相関関係は見られないことがわかる。図 4.2 は H バンド等級を縦軸、偏光方位角と横軸にしたグラフである。この図と図 4.1 を比較すると、最も偏光度が高い 2 点の偏光方位角は大きく異なっていることがわかる。もし、ジェットからのシンクロトロン放射が強くなることで偏光度と光度が上昇したのであれば、光度が高い時期の偏光方位角は同程度の値になることが期待される。しかし、観測された偏光度の高い 2 点は大きく異なる偏光方位角を持っているため、その起源は異なる可能性が高い。図 4.1 からは、天体が最も暗い状態にある 2 点でも偏光度が 6.72–11.1% と比較的高いことがわかる。しかし、これらの 2 点も偏光方位角は異なるため、同一の起源ではないかもしれない。GRS 1915+105 の近赤外線域では、ジェットからの放射の他に降着円盤や伴星からの熱放射も寄与していると考えられている (図 1.13、[11])。天体が暗くなり偏光度が高くなるということは、ほぼ無偏光である降着円盤もしくは伴星の放射が弱まり、相対的にジェットからのシンクロトロン放射の寄与が高まったと解釈できる。また、この 2 点のうち、偏光度が 11% のものは偏光方位角が 137(-43) 度である。この角度は GRS 1915+105 の電波ジェットの方位角 142 度に近い (図 1.6 参照)。ジェットの方向と偏光の方向が近いということは、ジェットの方向と放射領域の磁場が垂直の関係にあることを意味する。ジェットに対して垂直な磁場は、ジェットに沿って移動する衝撃波によって圧縮された領域で発生すると考えられている [20]。したがって、この観測点はそのようなモデルで説明できるかもしれない。

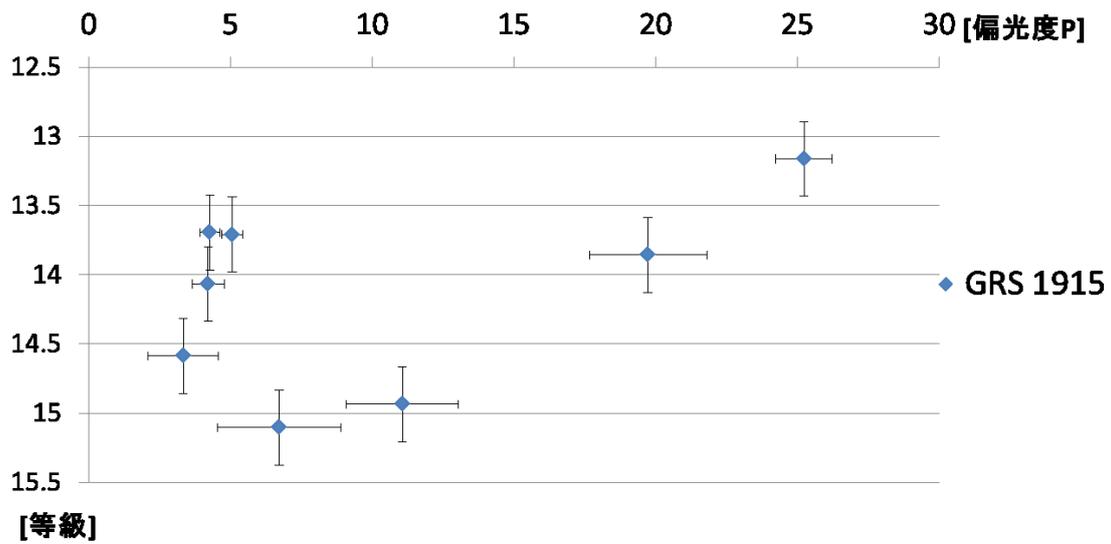


図 4.1: 近赤外等級と偏光度の関係

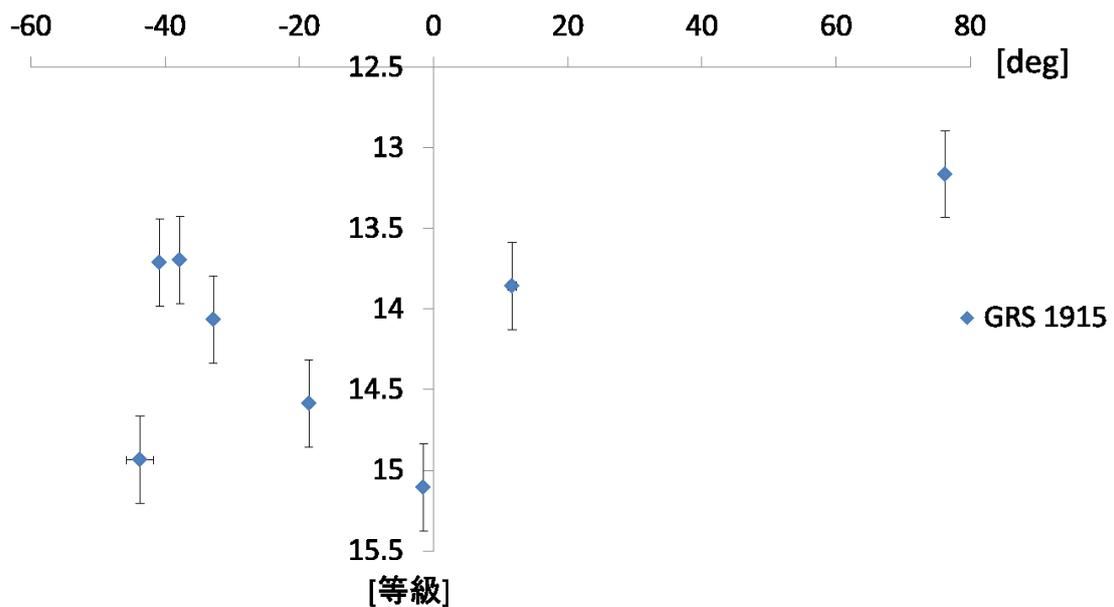


図 4.2: 等級と偏光方位角の散布図

4.2 X線の光度変動と偏光度の関係

前節では近赤外光度とその偏光度の間に明確な相関関係は見られなかったことを述べた。ここではX線域での明るさと近赤外線偏光度の関係について述べる。X線データは国際宇宙ステーションに搭載され

ている全天 X 線監視装置「MAXI」の公開データを用いた [21]。図 4.3 は X 線フラックスと偏光度の散布図である。X 線データは 1 日平均のものを用い、近赤外線観測のデータと日付の近い、もしくは同日のデータを用いている。X 線データはそのエネルギー帯域ごとに示してある。図 4.3 より、近赤外光度と同様、X 線での明るさと偏光度の間に明確な相関はないことがわかる。また、X 線で明るい時期、もしくは偏光度の高い時期に注目しても、前節のような特徴は見られない。これはいずれの X 線の帯域でも同様である。

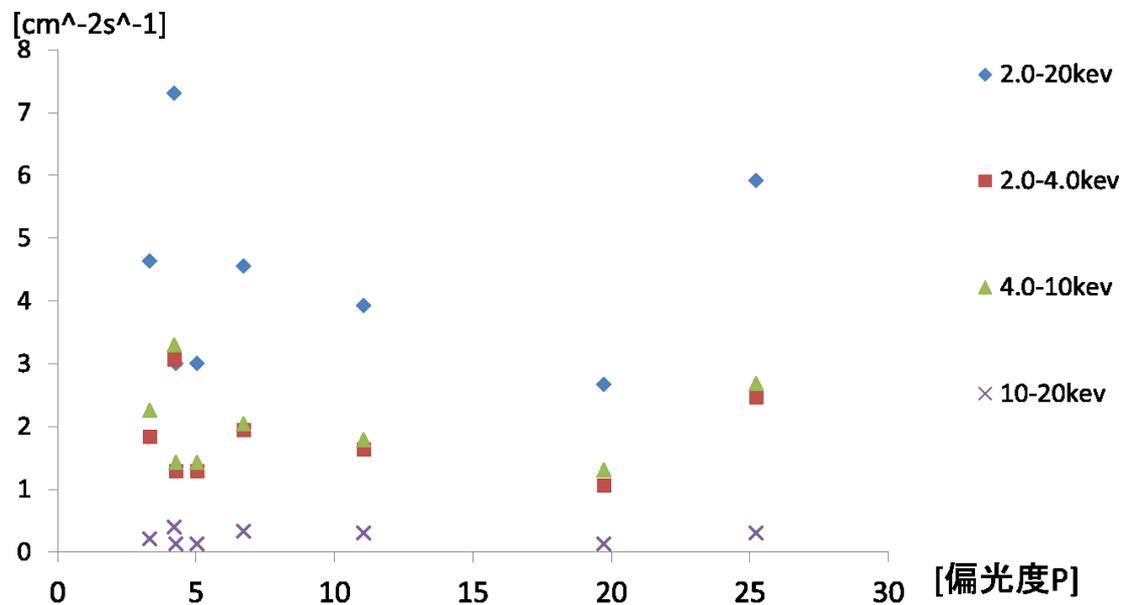


図 4.3: X 線フラックスと偏光度の散布図 [22]

図 4.4 は、2.0–4.0 keV の軟 X 線フラックス (F_s) と 10–20 keV の硬 X 線フラックス (F_h) で定義される Hardness Ratio (HR): $HR = (F_s - F_h)/(F_s + F_h)$ と近赤外線偏光度の散布図である。X 線フラックスと同様、 HR と偏光度も単純な相関関係は見られなかった。

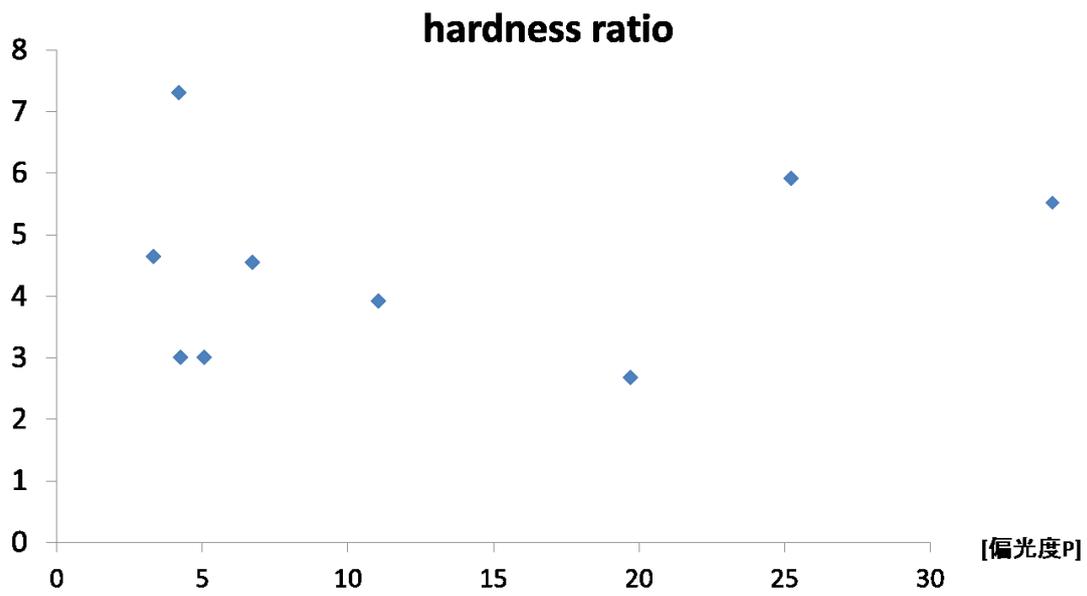


図 4.4: X 線の Hardness ratio と近赤外偏光度の散布図 [22]

第5章 結論

本研究ではブラックホール X 線連星 GRS 1915+105 の近赤外線偏光モニター観測を行い、偏光パラメータの時間変動を調べた。その結果、有意な偏光パラメータの変動を捉えることに成功した。全データの内、半数は星間偏光成分が卓越している状態であることが、周囲の星の測定から示唆された。それ以外は 6–25% の高い偏光度をもち、過去に 2 回だけ行われた偏光観測と方位角が一点一致する結果が得られた。一方で、偏光度と近赤外光度や X 線フラックスの間に単純な相関関係は見られず、高い偏光度の起源は不明である。ただし、少なくとも 1 つの偏光度の高い状態では偏光方位角とジェット方位角が近く、ジェットを伝搬する衝撃波面からの放射モデルで説明できる可能性がある。今後、よりデータを増やすことで偏光度の高い状態で偏光方位角の分布に偏りがいないか、もしくは X 線データとの 1 日以下の変動も考慮した比較、などを調べることで、偏光とその時間変動の起源を明らかにし、近赤外域のジェットの寄与、さらにはジェット全体の物理状態を明らかにすることが望まれる。

謝辞

今回いろいろな方々に支えられて修士論文を書き終えることができました。特に植村先生には四年生の時の卒業論文の時からお世話になり、約三年間ご指導していただきました。天文学会や研究会なども含めとても充実した日々を過ごさせていただきました。これから社会人になりますが、自分らしく生きてゆこうと思います。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] C. M. Urry & P. Padovani, 1995, PASP, 107, 803
- [2] H. Kubo, et al., 1998, ApJ 504, 693
- [3] G. Ghisellini, et al., 2014, Nature, 515, 376
- [4] D. Russell, 2008, Ph.D. Thesis (November 2007, University of Southampton), arXiv:0802.0816
- [5] I. F. Mirabel, et al., 1998, Nature, 392, 673
- [6] R. P. Fender, et al., 1999, R. Astron. Soc. 304,
- [7] S. Markoff, et al., 2001, A&A, 372, L25
- [8] M. Kimura, et al., 2016, Nature, 529, 54
- [9] Y.T.Tanaka, et al., 2016, The Astrophysical Journal, 823, 35
- [10] Rob Fender, et al., 2004, Annu. Rev. Astron. Astrophys., 42, 317
- [11] Ethan T. Neil, et al., 2007, The Astrophysical Journal, 657, 409
- [12] Akira, Arai, et al., 2009, PASJ 61, L1
- [13] T. Shahbaz, et al., 2008, ApJ, 672, 510
- [14] 神田優花 2016 広島大学 修士論文
- [15] <http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/summary.html>
- [16] <http://hasc.hiroshima-u.ac.jp/instruments/honir/index-j.html>
- [17] 高木勝俊 2012 広島大学 卒業論文
- [18] M. F. Skrutskie, et al., 2006, AJ, 131, 1163
- [19] <http://kanatatmp.g.hatena.ne.jp/kanataobslog/20090429/p3>
- [20] A. P. Marscher, W. K. Gear, 1985, ApJ, 298, 114 P. A. Hughes, et al., 1985, ApJ, 298, 301
- [21] M. Matsuoka, et al., 2009, PASJ, 61, 999
- [22] http://maxi.riken.jp/star_data/J1915+109/J1915+109.html