

修 士 学 位 論 文

Subaru/HiCIAO 近赤外撮像観測による
HD 169142 に付随する原始惑星系円盤の空間構造の検証

2011 年度
(平成 23 年度)

茨城大学 大学院 理工学研究科
理学専攻 物理系

10NM166S
森田彩佳

平成 23 年 2 月 6 日

要旨

本研究の目的は、Subaru/HiCIAOにより取得された前主系列星 HD 169142 の赤外撮像データを解析し、そこに付随する原始惑星系円盤の存在と、その空間構造を明らかにすることである。HD 169142 は、太陽系から 145pc の距離に存在するスペクトル型 A8Ve の前主系列星である。過去の研究から、傾斜角 13 度とほぼ face-on に配置をした円盤を持つと考えられていた。円盤構造をより詳しく明らかにするため、今回は、Subaru に搭載された新コロナグラフ撮像装置 HiCIAO を用いて、円盤散乱光を良くとらえられる H バンド ($1.65\mu\text{m}$) での観測を行った。HiCIAO とは、高コントラストコロナグラフ撮像装置 (High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics) の略称で、コロナグラフと差分撮像光学を可能にする光学系とともに備えた装置である。コロナグラフは、中心星をマスクすることにより、中心星と星周円盤からの放射のコントラストを抑える装置である。円盤からの散乱光は HD 169142 本体からの放射に比べ著しく微弱なため、そのままのコントラストでは円盤からの光を抽出することが難しい。これまでより小さなマスクをもつ HiCIAO を用いることで、HD 169142 に付随する円盤散乱光を星のより近傍まで検出できると期待される。さらに差分撮像光学系により、円盤散乱光のように直線偏光した光を効率的に撮像する PDI モード (偏光撮像法) と、観測時の、点源応答関数 (PSF) を安定化させる ADI モード (角度差分撮像法) の、両者を組み合わせた観測も可能である。PDI は、2つの異なる偏光成分画像を同時取得し、その差を取ることで共通する sky ノイズや無偏光成分を高い精度で除去する。一方 ADI は、スペックルの原因であるスパイダーパターンを固定するために瞳面を追尾することで各フレームにおける PSF を安定させる。今回用いた HD 169142 の観測データは、この PDI + ADI モードで取得された。

解析では、画像データからバイアスの除去、フラット補正、バッドピクセルの除去、位置合わせ、歪み補正、器械偏光の補正、回転角の補正を行い、ストークスパラメータ Q , U の画像を取得し、偏光強度と偏光角を計算した。この時、観測条件の悪いフレームから順々に間引いていき、信号雑音比が最適になるようにフレームを選別した。また、円盤を持っていない天体 HD 166903 のデータ解析も HD 169142 と同様に行い、偏光強度を計算した。理論的には、HD 166903 のデータには円盤由来の偏光成分は見込まれないため、この偏光強度の画像は、大気や器械由来の残渣的な偏光である。両データの偏光強度を比較した結果は、HD 169142 の広がった成分の強度が HD 166903 の強度の 5 倍程度の値を示し、円盤が有意に検出されていた。偏光強度の解釈ではまず、円盤の半径 $0.45''$ 付近でギャップ構造を確認した。更に方位角 95° (短軸) のギャップ内には他のギャップ領域の平均的な数値の 1.5 倍の明るさを示す成分を確認した。また、円盤短軸と長軸方向で非軸対称性を確認した。円盤外縁構造で非対称性が見られ、 $\theta = 95^\circ$ の表面輝度に対し、 $\theta = -85^\circ$ 方向は約 60 %、 $\theta = 5^\circ$ 方向は約 30 %であった。これらの非軸対称性は光蒸発では説明が難しいため、ギャップ内部に惑星の存在を示唆する結果となった。

目次

第1章 Introduction	1
1.1 赤外線天文学	1
1.2 小～中質量星の星形成	2
1.2.1 原始惑星系円盤	3
1.2.2 スペクトルエネルギー分布による分類	3
1.3 近赤外域における円盤散乱光の観測方法	5
1.4 研究の目的	6
第2章 すばる望遠鏡に搭載されたコロナグラフ装置 HiCIAO	7
2.1 すばる望遠鏡	7
2.2 観測手法	7
2.2.1 偏光観測 (PDI)	7
2.2.2 角差分撮像法 (ADI)	9
2.3 コロナグラフ	11
2.4 HiCIAO	12
2.4.1 補償光学モジュール	13
2.4.2 コロナグラフモジュール	16
2.4.3 高コントラスト光学モジュール	16
2.4.4 HiCIAO 概略図	17
第3章 HiCIAO を用いた HD 169142 観測	19
3.1 対象天体 HD 169142	19
3.2 観測データ	19
3.3 解析の流れ	20
3.3.1 バイアス除去	21
3.3.2 ピクセル感度の規格化	25
3.3.3 バッドピクセルの除去	26
3.3.4 垂直成分と水平成分の切り離し	28
3.3.5 左右のピクセルの位置合わせと歪み補正	29
3.3.6 背景光の引き残りの除去	29
3.3.7 ストークスパラメータの導出	31
3.3.8 PDI モードで撮られたデータの器械偏光補正	33
3.3.9 PDI+ADI モードで撮られたデータの器械偏光の補正	36
3.3.10 偏光強度 (PI) の算出	41
3.3.11 悪条件下のフレーム除去	42
3.3.12 偏光強度 (PI) の誤差判定	44

3.3.13	PSF 標準星との比較	45
3.3.14	S/N マップ	47
3.3.15	星の位置の導出	47
第 4 章	結果	51
4.1	偏光強度画像	51
4.1.1	偏光強度の動径分布	52
4.1.2	偏光強度の方位角分布	56
4.1.3	偏光角	58
4.1.4	偏光度の下限值	59
4.2	結果のまとめ	59
4.3	議論	60
4.4	まとめ	62
付 録 A	PSF 標準星 HD166903 の解析	63
A.1	解析	63
A.2	PSF 標準星の回転中心の算出	67
付 録 B	偏光度	69
付 録 C	ADU $\Leftrightarrow$ mJy 変換値	73

目 次

1.1	各黒体温度における黒体放射 (ピークとなる波長が赤外線域)	2
1.2	(a) 黒体放射をしている天体を観測した場合のスペクトルエネルギー分布 (b) 赤外 超過を観測した場合のスペクトルエネルギー分布	3
1.3	スペクトルエネルギー分類	4
1.4	(a) 円盤ダストへ向かって中心星から放射 (b) ダストによって散乱	5
2.1	すばる望遠鏡	7
2.2	楕円偏光	8
2.3	ADI モードで撮られた観測時刻の異なる 2 枚のフレーム	10
2.4	(a) すばる望遠鏡模式図 (b) スパイダーパターン	10
2.5	(a) コロナグラフを使わずに直接撮像 (b) 中心星を遮光円盤で遮断 (c) リオストップ でマスク付近の回折を抑えて最終的に検出される光	11
2.6	(a) 中心星を遮光円盤で遮断した時に得られた画像 (b) コロナグラフを使わずに直 接撮像した場合に得られた画像	11
2.7	HiCIAO 概念図	12
2.8	(A) 入射光の入射 (B) 入射光が半波長板を通過 (C) 検出器で検出	14
2.9	半波長板の効果	14
2.10	ウォルストンプリズム	16
2.11	HiCIAO 光学系模式図 1	17
2.12	HiCIAO 光学系模式図 2 : 半波長板 0 度と 45 度	18
2.13	HiCIAO で検出されたデータ	18
3.1	本解析の流れ	20
3.2	(a) 生データ (b) 64 ピクセル感覚のバイアス横縞	21
3.3	検出器 (CMOS) の読み出し方 (b) 上から見た図	22
3.4	(a) 補完されているダークの位置の模式図 (b) 生データのダークの位置	23
3.5	縦縞除去用フレームの作り方	24
3.6	ピンク色で囲んだ部分以外のスカイを各縞毎に測る	24
3.7	(a) HD169142 生データ (b) (a) の縞を除去	25
3.8	作成したフラットフレーム	26
3.9	ピクセル感度の規格化	26
3.10	(a)(b) バッドピクセルの位置	27
3.11	バッドピクセルの除去法	27
3.12	(a) バッドピクセル除去前 (b) 除去後	28
3.13	(a) 垂直成分 (b) 水平成分	28

3.14 (a) 歪み補正をする前 (垂直成分 (左) 水平成分 (右)) (b) 歪み補正をした後 (垂直成分 (左) 水平成分 (右))	29
3.15 背景光の測定領域 (垂直成分)	30
3.16 (a) 歪み補正後 (垂直成分) (b) 引き残り除去後 (垂直成分) (c) 歪み補正後 (水平成分) (d) 引き残り除去後 (水平成分)	30
3.17 半波長板通過後に検出される成分 (a) 半波長板 0 度 (b) 半波長板 45 度	31
3.18 理論的に期待される Q (左) と U (右) のパターン (face on disk)	32
3.19 (a) Q' (b) $-Q'$ (c) U' (d) $-U'$ (e) I'_0	33
3.20 ADI 回転角 (α)	36
3.21 背景星の位置	37
3.22 フレーム間の回転角 β	38
3.23 緑 : マスク中心 (447,893) ピンク : 回転中心 (447.9,897.2)	39
3.24 (a) 補正前 Q (b) 器械偏光と ADI 回転角補正後 Q	40
3.25 器械偏光補正と ADI 回転角補正後の Q と U を平均化したもの (a) Q (b) U	41
3.26 偏光強度 (PI)	41
3.27 計算した中心星の位置から, 半径 30 ピクセル (ピンク) と 45 ピクセル (緑) の円	42
3.28 (a)PSF が小さいフレーム (b)PSF が大きいフレーム	42
3.29 (a) 除去なし PI (b)1 枚除去 PI (c)2 枚除去 PI (d)3 枚除去 PI (e)4 枚除去 PI	43
3.30 S/N 最適にした偏光強度画像	44
3.31 (a) Q (b) U (c) ΔQ (d) ΔU (e) PI (f) ΔPI (g)(h) 領域 1-6	45
3.32 (a)PSF 標準星 HD166903 の観測データから算出した PI (b)HD169142 の PI の画像における領域 1~10 の位置 (b) PSF 標準星 HD166903 PI の画像における領域 1~10 の位置	46
3.33 S/N マップ	47
3.34 星の PSF の広がり (左) マスクの中で星の位置が一致していた時としていない時の同心円 (右)	48
3.35 (a)(b) I と PI における半径 $0.8''$ から $1.25''$ の同心円 (c) 測定した中心位置	49
3.36 I における方位角方向の標準偏差 (a)55175 のフレーム (b)55175 のフレームの $r>1''$ の範囲 (c)55246 のフレーム (d)55246 の $r>1''$ の範囲	50
4.1 偏光強度 PI [$\text{mJy}/\text{arcsec}^2$]	51
4.2 PI (a) ピンク : 星の位置 (=回転中心) 緑 : コロナグラフマスクの位置 (b) 円盤の長軸と短軸を示した PI	52
4.3 (a) 方位角方向で平均した動径分布, 横軸半径距離, 縦軸 PI をログスケールでプロットしたもの (b) (a) の $0.25'' < r < 0.4''$ の範囲でフィッティングした関数 (c) (a) の $0.7'' < r < 1.0''$ の範囲でフィッティングした関数 (d) コロナグラフマスク	53
4.4 log スケールでプロットした動径分布 (a) 長軸方向 (5 度) (b) 長軸方向 (185 度) (c) 短軸方向 (95 度) (d) 短軸方向 (275 度)	54
4.5 円盤内縁と外縁の極大値と円盤ギャップの極小値	55
4.6 (a) 方位角 50 度 ~230 度で積分した動径分布 (b) 方位角 230 度 ~50 度で積分した動径分布	55

4.7	<i>PI</i> 画像 (a) ピンク:星の位置 緑:マスク 黄色:半径 $1''$ (b) 方位角分布をプロットした半径	56
4.8	方位角 $0.27''$ の方位角分布	56
4.9	方位角 $0.35''$ の方位角分布	56
4.10	方位角 $0.40''$ の方位角分布	57
4.11	方位角 $0.50''$ の方位角分布	57
4.12	方位角 $0.57''$ の方位角分布	57
4.13	方位角 $0.27''$ $0.35''$ の方位角分布	57
4.14	方位角 $0.50''$ $0.57''$ の方位角分布	57
4.15	理想的な場合の直線偏光のベクトルの向き	58
4.16	<i>PI</i> における偏光角を計算した領域	58
4.17	偏光角のベクトルマップ	58
4.18	(a)(b) ギャップ左領域の位置 (c) ギャップ左領域の偏光角	59
4.19	HD 169142 原始惑星系円盤構造	60
4.20	(左)HD 169142 の方位角方向で積分した実際の動径分布 (右) 単調にフレアアップしている円盤を仮定した場合の動径分布	61
A.1	(a)HD 166903 生データ (b) バイアス縞を除去したフレーム (c)HD 169142 の解析で用いたフラットフレームを用いて規格化したフレーム (d) バッドピクセル除去後のフレーム	63
A.2	(a) 垂直成分 (b) 水平成分 (c) 位置合わせと歪み補正後の垂直成分 (d) 位置合わせと歪み補正後の水平成分 (e) 背景光の引き残り除去後の垂直成分 (f) 背景光の引き残り除去後の水平成分	64
A.3	器械偏光を含むストークスパラメータの導出 (a) Q' (b) $-Q'$ (c) U' (d) $-U'$ (e) I'	65
A.4	(a) 器械偏光補正後 Q (b) 器械偏光補正後 U (c) 器械偏光補正後 I (d) <i>PI</i> を導出したのち平均化したフレーム (e) 平均化した I のフレーム	66
A.5	HD 169142 の <i>PI</i> と PSF 標準星の <i>PI</i> の比較	67
A.6	HD 166903 の背景星の位置	67
A.7	HD 166903 の回転中心	67
A.8	回転中心を計算値とマスク中心にしたときの I の比較	68
A.9	回転中心を計算値とマスク中心にしたときの I の比較	68
B.1	偏光度下限値	69
B.2	(a)HD 169142 の I (b)HD 166903 の I (c)HD 166903 の I を 195 度回転させる (d)HD 166903 の I の中心の位置を HD169142 に合わせる	70
B.3	絶対等級の比から出した I (円盤)(左) と偏光度 (右)	71
B.4	(1)PSF 標準星 0.6 倍 I_{disk} (2)PSF 標準星 0.55 倍 I_{disk} (3)PSF 標準星 0.5 倍 I_{disk} (4)PSF 標準星 0.45 倍 I_{disk} (5)PSF 標準星 0.4 倍 I_{disk}	71
B.5	(1)PSF 標準星 0.6 倍 P (2)PSF 標準星 0.55 倍 P (3)PSF 標準星 0.5 倍 P (4)PSF 標準星 0.45 倍 P (5)PSF 標準星 0.4 倍 P	72

表 目 次

1.1	放射強度が赤外線域でピークになる黒体温度	1
3.1	HD 169142 と HD 166903 の近赤外線と可視光の絶対等級 (出典 : http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/)	19
3.2	観測諸元	19
3.3	解析で使ったファイル群	20
3.4	背景光除去前と除去後のピクセル値の比較	30
3.5	回転中心計算の結果	38
3.6	回転中心最適値	39
3.7	PI を基準にした PI と PI のエラーの比較	45
3.8	HD 169142 の PI と PSF 標準星の PI の比較	46
4.1	長軸と短軸方向の動径分布の single power law fit 結果	53
4.2	長軸と短軸方向の動径分布の single power law fit 結果	54

第1章 Introduction

1.1 赤外線天文学

赤外線天文学とは、赤外線を天体観測の手段として用い、宇宙で起きている現象や天体を研究する学問である。

赤外線とは、電磁波の長さが可視光線よりも長く、サブミリ波よりも短いものを指し、その長さはおおよそ $0.7\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ である。特に、 $0.7\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$ のものを近赤外線、 $2.5\mu\text{m} \sim 4\mu\text{m}$ の間を中間赤外線、 $4\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ のものを遠赤外線と呼ぶ。本研究では、近赤外線域の H バンド ($1.65\mu\text{m}$) で取得した観測データを扱った。天体観測を行う際、観測波長と観測対象天体の間には密接な関係がある。これを説明するために、まず黒体放射について説明する。

黒体放射

物体からの熱放射を考える際に、全ての入射光を吸収する理想的な物質として、“黒体”という概念を導入する。黒体は、全ての入射光を吸収し、かつ同量の熱放射を行う。黒体が電磁波と熱平衡にあるときの熱放射を黒体放射といい、式 (1.1) で表されるプランク関数で書き表すことができる。この形状は黒体の熱放射の温度 (T)、ただ一つのパラメータで決定される。

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}. \quad (1.1)$$

ここで、 T は黒体の温度、 $B_{\lambda}(T)$ は、温度 T の黒体の波長域 λ での輝度、 h はプランク定数、 c は光速、 k はボルツマン定数を表す。黒体放射は黒体の温度上昇に伴い、放射強度のピークとなる波長域が短くなる。この単位波長あたりの放射エネルギー密度がピークとなる波長 λ_m は、ウィーンの変位則として式 (1.2) として表される。

$$\lambda_m \sim 2898T^{-1}[\mu\text{m}]. \quad (1.2)$$

赤外域での放射強度がピークとなる、波長と温度の関係は、表 (1.1) の通りである。

赤外線の種類	波長域 [μm]	黒体放射の温度 [K]
近赤外線	$0.7 \sim 2.5$	$3000 \sim 600$
中間赤外線	$2.5 \sim 4$	$600 \sim 100$
遠赤外線	$4 \sim 100$	$100 \sim 10$

表 1.1: 放射強度が赤外線域でピークになる黒体温度

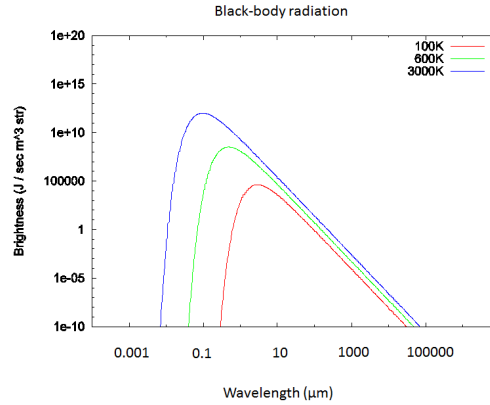


図 1.1: 各黒体温度における黒体放射 (ピークとなる波長が赤外線域)

赤外線観測では、表 (1.1) で表される温度で熱放射を行なっている天体を観測することができる (原始惑星系円盤, 系外惑星等). 赤外線は自身の波長スケールと同程度か, 十分小さい物体によって散乱されうる. 今回の観測では, この散乱光を観測した. これについては, §1.3 で詳しく記述する.

1.2 小～中質量星の星形成

恒星は, ガスと星間微粒子からなる分子雲が, 重力収縮することで形成される. 分子雲の密度は一般的に, 水素個数密度 $n(H) = 10^2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ である. なかでもガス密度が高く, 星が形成される可能性が高い領域を分子雲コア (molecular cloud core) と呼び, 密度は, 水素分子個数密度で約 10^4 cm^{-3} 以上である. 典型的なサイズは $0.1 \text{ pc} \sim 1 \text{ pc}$ で, 質量は数十 $M_{\odot}$ 程度である. 分子雲コアは遠赤外でのダスト連続波放射に対して光学的に薄く, 外部への放射を介してエネルギーを解放しうするため, 広い密度範囲で $\sim 10 \text{ K}$ 程度の等温状態にある. この段階から更に重力収縮が進み, 赤外線に対して光学的厚みが厚くなると, 外部への放射が不透明になり, 分子雲の温度が上昇する. このガス球が, 恒星への進化段階である原始星の状態である.

原始星は, 質量降着によって星の質量が増加している状態と定義される. 質量降着はやがて停止すると考えられるが, 未だ詳細は明らかでない. 質量降着が落ち着いた原始星は, 質量 $1M_{\odot}$ の場合約 $4R_{\odot}$ の半径を持ち, その中心の温度は約 $4 \times 10^6 \text{ K}$ である. この質量降着期においては, ガスは角運動量を持っているため, 直接原始星に降着するだけではなく, 星周円盤に降着すると考えられる. この星周円盤こそが, 惑星形成の場であると考えられている原始惑星系円盤である. 原始惑星系円盤は本研究の対象天体であるので, §1.2.1 で詳しく述べる.

概ね質量降着が落ち着いた星は, その後ゆっくりと収縮し, 重力エネルギーを解放する. 星の半径が太陽半径程度にまで小さくなると, 中心温度が $\sim 10^7 \text{ K}$ まで上昇し, 水素燃焼反応が始まる. これが, 恒星の前段階である前主系列星である. この状態から核融合反応が始まり, 円盤のガスが散逸すると恒星となる.

1.2.1 原始惑星系円盤

原始惑星系円盤は、惑星形成の前段階であり、ガスとサブミクロンサイズ程度のダスト(塵)が混じり合って構成されている。円盤は、分子雲から主系列星への進化の段階で形成され、惑星系形成過程の経過と共にダストが合体成長し、微惑星が形成されると考えられている。よって、円盤から形成される惑星の様子を理解するためにも、原始惑星系円盤の詳細な理解が重要である。原始惑星系円盤の放射は、中心星の放射に比べて極めて微弱であるため、それ自身の検出は困難とされてきたが、近年赤外線やサブミリ波の観測技術の進展により、直接撮像が可能となってきた。この結果、円盤構造が軸対称のものはもちろん、非軸対称や、渦巻き状の構造を持つものも確認された。

1.2.2 スペクトルエネルギー分布による分類

スペクトルエネルギー分布

スペクトルエネルギー分布 (SED) とは、天体放射の波長依存性を横軸に波長 (周波数)、縦軸にフラックス × 波長 (周波数) として表したものである。観測対象が黒体放射をしていた場合、この分布はプランク関数で表される。(図 1.2a)

一方で、前主系列星のような原始惑星系円盤を伴っている場合、中心星の放射によって円盤が温められ、円盤自身の熱放射が観測される。また、近赤外線のような短い波長は円盤を恒星するダストによって散乱され、近赤外線の散乱光も観測される。このような場合、観測で得られるスペクトルエネルギー分布は、黒体放射から得られるものに比べ、赤外線領域での超過が見られる。これを赤外超過という。(図 1.2b)

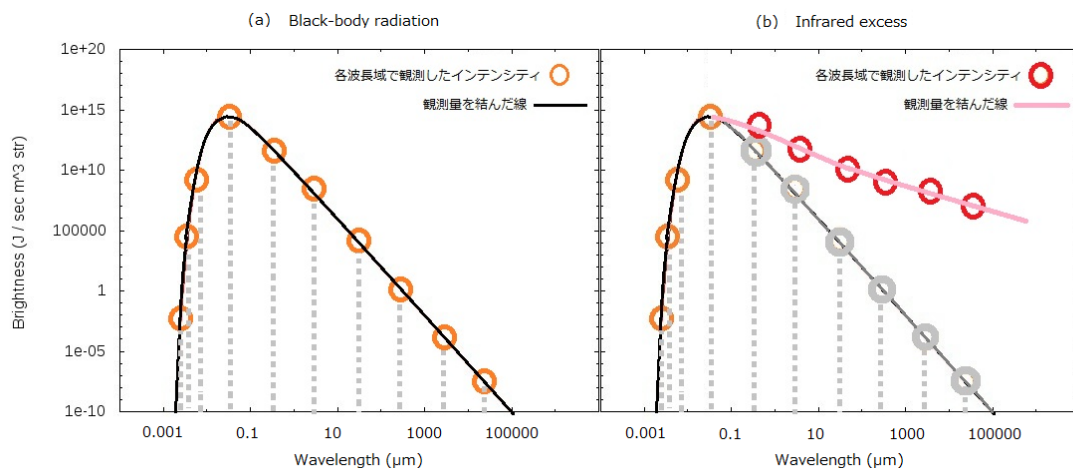
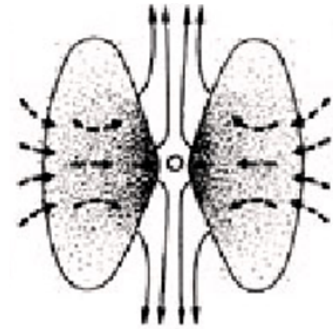
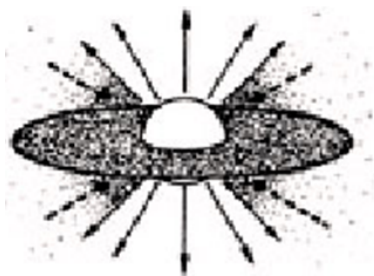
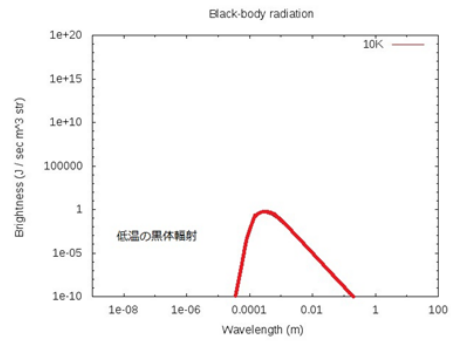


図 1.2: (a) 黒体放射をしている天体を観測した場合のスペクトルエネルギー分布 (b) 赤外超過を観測した場合のスペクトルエネルギー分布

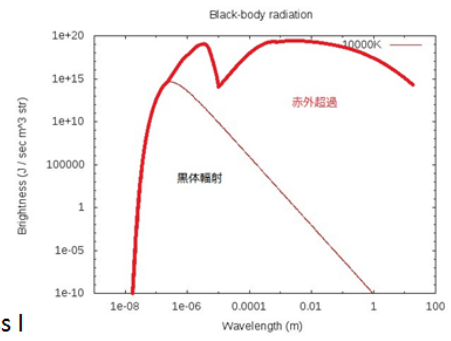
星形成過程の各状態を、スペクトルエネルギー分布から得られる赤外超過の度合いで分類することができる。(図 1.3a~d)



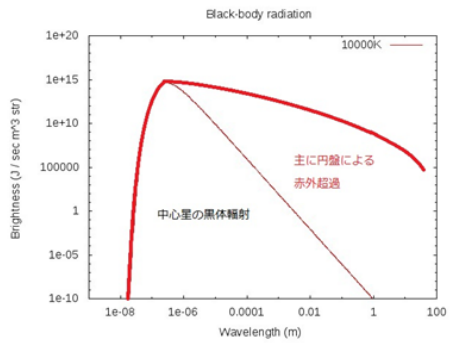
(a) Class 0



(b) Class I



(c) Class II



(d) Class III

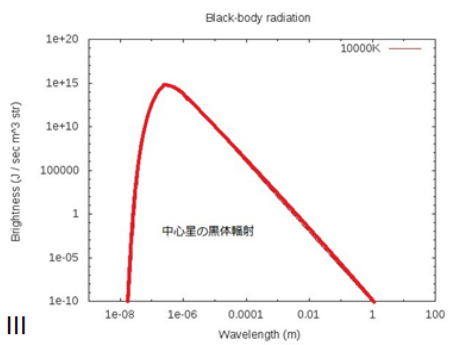


図 1.3: スペクトルエネルギー分類

- CLASS 0
ガスやダストが原始星に向かって、激しく質量降着している段階。原始星はガスやダストに埋もれて可視光では直接見ることはできない。
- CLASS I
原始惑星系円盤が形成され、赤外超過が顕著になる。赤外超過部分 ($2.2\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$) の傾きが正である。
- CLASS II
質量降着が低下し、円盤からの熱放射や円盤散乱光による赤外超過が見られる。超過部分の傾きは、 -2 より大きく、負の値である。
- CLASS III
円盤のガスが散逸し、ほぼ黒体輻射に等しい放射が観測される。

1.3 近赤外域における円盤散乱光の観測方法

近赤外線域における円盤観測の方法としては、次の二種類の方法がある。一つは、中心星の放射が円盤を構成する物質にあたり、物質が温められ、その結果として放出される、円盤自身の熱放射を観測する方法である。これは、近赤外線より長波長域での赤外超過を観測する等で観測される。

もう一つは、中心星放射を円盤構成物質であるダストが散乱した光を観測する方法である。天体の周りにダストが分布している場合、中心星からの放射はダストによって散乱された後、地球で観測される。このような光は、光源天体とダストとを結ぶ向きと直交する方向の直線偏光成分が卓越する。この性質を利用し、星周物質の直線偏光を測定すると、散乱表面の幾何学を決定することができる。

本研究で扱う観測データは、H バンド ($1.65\mu\text{m}$) 帯で後者を検出したものである。

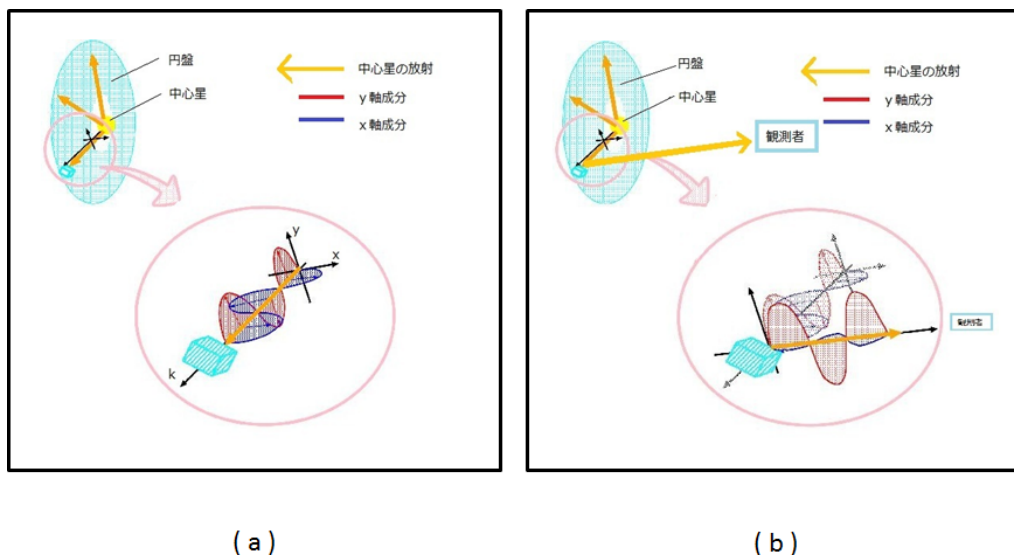


図 1.4: (a) 円盤ダストへ向かって中心星から放射 (b) ダストによって散乱

観測される光は、図 1.4(b) で示すように、光源天体とダストを結ぶ向きと平行な成分は吸収され、直交する成分だけが残る。このため、直線偏光が観測される。

1.4 研究の目的

ここまで記した通り、原始惑星系円盤とは惑星形成の初期段階であると考えられている場所である。これを詳細に理解することは、地球のような太陽系内惑星の起源を知るために重要である。私たちの最も身近な太陽系は、惑星系形成の進化が進んだ状態であるので、惑星系形成時の記録を見出すことが困難である。よって、形成過程に関する知見も限られているため、太陽系内の研究を進めるだけでは、惑星形成の本当の意味での理解は得られない。このため、太陽系外の星形成段階にある天体の研究を進めることで、惑星形成過程の理解、ひいては太陽系形成の理解を進めることができる。また、現在見つかっている太陽系外惑星の中には、太陽系ではほぼ円軌道である惑星の軌道が、極端な楕円であったり、傾斜角が大きいものも存在する。惑星形成過程の理解を進めることで、このような惑星の形成について議論を進めることもできるだろう。

中質量星は小質量星に比べて明るく、重力も大きいので円盤の面積も大きいことが予想される。このため、星形成領域の詳細な構造を観測するために適している。今回観測した HD 169142 も質量 $2 M_{\odot}$ ($2.5 M_{\odot}$) の中質量星で、過去の研究から、原始惑星系円盤を持つ前主系列星であることが示唆されている。そしてこの円盤は、半径 $0.15''$ 以内に円盤の密度減少領域である“穴”の存在が示唆されている (HD 169142 の詳しい説明は §3.1)。中心星付近の“穴”は、中心星の放射によって光解離を起こすか、もしくは惑星の形成によって円盤構成物質が掃かれた結果、形成されたものと考えられてきた。

本研究では、天体から約 30AU 以遠の円盤空間構造をより明らかにすることで、“穴”の存在がどのような経緯でできたものかを議論する。もし光解離であるとする、穴のすぐ外側の円盤構造は対称の構造であるとして予想され、非対称な構造であれば、惑星の存在を示唆する結果となる。どちらであっても、円盤構造の生成過程に制限を付けることが期待される。

第2章 すばる望遠鏡に搭載されたコロナグラフ装置 HiCIAO

HiCIAO は、すばる望遠鏡の高コントラストコロナグラフ装置であり、星の近傍に位置する原始惑星系円盤や太陽系外惑星などの、星との強度比が大きい天体を直接撮像するのに適した装置である。ここでは、すばる望遠鏡全体と HiCIAO について述べる。

2.1 すばる望遠鏡

すばる望遠鏡は、標高 4,200m のハワイ島マウナケア山頂にある大型光学赤外線望遠鏡である。単一鏡としては世界最大級の口径 8.2m をもち、天体からの微弱な光も集光可能である。更に、高い鏡面精度を維持する能動光学をはじめ、空気の乱れをおさえるドーム、差分撮像光学により高解像度の観測を実現する。これにより、系外惑星や原始惑星系円盤の観測も期待されている。

現在すばる望遠鏡では、HiCIAO と補償光学装置 (AO188) を用いて太陽系外惑星と円盤の探査を目的とした、日本を中心とした国際共同プロジェクトである Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru, 通称 “SEEDS(シーズ)” が進行中である。SEEDS は観測装置の開発と試験運用を経て、2009 年 10 月末より科学的観測を開始した。SEEDS プロジェクトでは、5 年間で 120 夜の集中的観測を行い、約 500 個の天体の探査を行う予定である。本研究は、SEEDS プロジェクトによって取得されたデータの解析である。

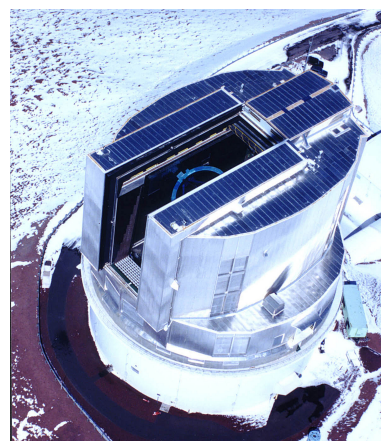


図 2.1: すばる望遠鏡

2.2 観測手法

ここでは、本観測で用いた観測方法である、偏光観測と角差分撮像法について記述する。

2.2.1 偏光観測 (PDI)

天体の周りにダストが分布している場合、天体からの光の一部はダストに散乱されたのち地球に届く。このような光は、光源天体からの放射のダストに対する入射角に垂直な方向に直線偏光する (§1.3)。この性質を利用して、散乱表面の直線偏光を測定すると、その物質 (ダスト) を照らす光源の位置や散乱表面の幾何学を決定することができる。

今回議論する偏光観測では、望遠鏡を通過してきた天体からの光を、ウォラストンプリズムなどの偏光素子を通し、光を異なる直交した 2 成分に分解する。その 2 成分の光を検出し、ストークスパラメータを計算することで、それを用いて偏光強度を計算する。

ここでストークスパラメータとは、偏光光の偏光状態を記述するためのパラメータであり、以下の式 (2.1) ~ (2.4) で定義される。

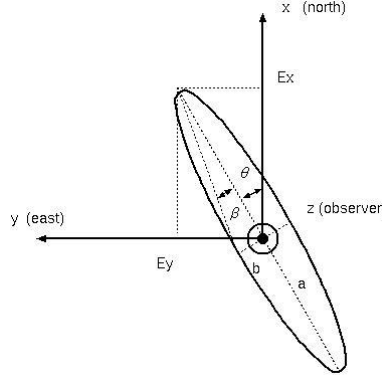


図 2.2: 楕円偏光

図 2.2 は、 x 軸を観測者から見て北向き、 y 軸は東向きに取った時の、楕円偏光を表した図である。

$$I \equiv E_x^2 + E_y^2, \quad (2.1)$$

$$Q \equiv E_x^2 - E_y^2 = I \cos 2\beta \cos 2\theta, \quad (2.2)$$

$$U \equiv 2E_x E_y \cos \delta = I \cos 2\beta \sin 2\theta, \quad (2.3)$$

$$V \equiv 2E_x E_y \sin \delta = I \sin 2\beta. \quad (2.4)$$

ここで、 E_x は観測した光の図 2.2 の x 軸方向の成分、 E_y は、 y 軸方向の成分、 θ は楕円偏光 (直線偏光含む) の長軸が x 軸から回転した角度、 $\tan \beta$ は楕円の長軸と短軸の比、 σ は位相差を表す。特に、半波長板の角度 θ' を通過した信号の垂直成分を $I_{\theta'}^H$ とすると、ストークスパラメータは $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ, 67.5^\circ$ での測定値をもとに、以下の式で求められる。(式 (2.5) ~ (2.7))

$$Q = I_0^H - I_{45}^H, \quad (2.5)$$

$$U = I_{22.5}^H - I_{67.5}^H, \quad (2.6)$$

$$I = I_0^H + I_{45}^H = I_{22.5}^H + I_{67.5}^H. \quad (2.7)$$

これは、半波長板を 45 度回転させると、通過する光は 90 度回転することを利用している (§2.4.1 で後述)。つまり、半波長板 0 度を通過した光の水平成分の強度と、半波長板 45 度を通過した光の垂直成分の強度は等しくなる。一般に偏光子は、特定の振動面の光のみを通す装置である (図 2.2 の E_x もしくは E_y のどちらかしか通さない) ため、この方法でストークスパラメータが求められる。

一方で、今回観測した装置 HiCIAO には、偏光子としてウォラストンプリズムが用いられている。この偏光子は、半波長板通過後の光のうち、垂直成分と水平成分を分離して、両方の成分を通

過させることができる．信号の水平成分を $I_{\theta'}^V$ とすると，HiCIAO の測定値を用いてストークスパラメータは，式 (2.8)～(2.12) から計算することができる．

$$Q = I_0^H - I_0^V, \quad (2.8)$$

$$-Q = I_{45}^H - I_{45}^V, \quad (2.9)$$

$$U = I_{22.5}^H - I_{22.5}^V, \quad (2.10)$$

$$-U = I_{67.5}^H - I_{67.5}^V. \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} I &= I_0^H + I_0^V \\ &= I_{45}^H + I_{45}^V \\ &= I_{22.5}^H + I_{22.5}^V \\ &= I_{67.5}^H + I_{67.5}^V. \end{aligned} \quad (2.12)$$

偏光撮像観測は，広がった天体の偏光度の空間分布などを調べる観測手法である．このストークスパラメータを用いて，観測した光の偏光状態を記述することができる．

$$PI = \sqrt{Q^2 + U^2}, \quad (2.13)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{U}{Q} \right) [\text{rad}], \quad (2.14)$$

$$P = \sqrt{\left(\frac{Q}{I} \right)^2 + \left(\frac{U}{I} \right)^2} \times 100[\%]. \quad (2.15)$$

ここで， PI は偏光強度， θ は楕円の x 軸からの回転角 (偏光角)， P は偏光度をそれぞれ表す．本観測では， PI =円盤散乱光の強度であるので， PI の幾何学的な広がりが散乱表面の広がりに相当し，強度は散乱体の密度，または円盤構成ダストの散乱効率に相当する．

2.2.2 角差分撮像法 (ADI)

角差分撮像法とは，観測時の点源応答関数 (PSF) を安定させるための方法である．PSF 変化の原因であるスパイダーパターン図 2.4(b) を固定するために，観測時に瞳面を追尾することで各フレームにおける PSF を最大限安定させる．

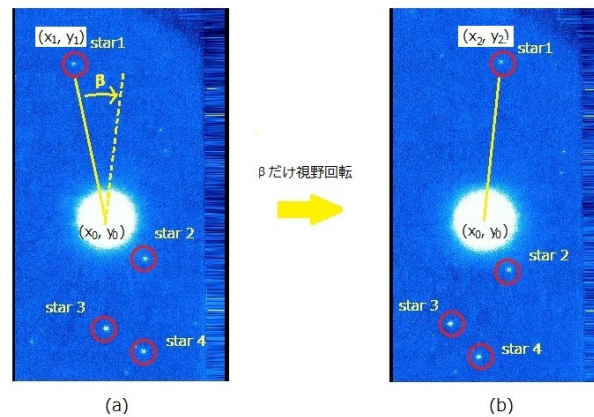


図 2.3: ADI モードで撮られた観測時刻の異なる 2 枚のフレーム

通常、視野全体を追尾し北の位置を常に一定 (真上など) になるように観測する。しかしそれでは、すばる望遠鏡の副鏡を支えるスパイダー部分が回転してしまい (2.4a), そこを通過する光の PSF が安定しない。PSF が安定しなければ、解析の過程で円盤散乱光と中心星の光を分離する際に、精度良く分離できないという問題が起こる。そのため、本観測では瞳面 (副鏡) を追尾し、スパイダーパターン図 2.4(b) を安定させて観測を行った。この方法では、観測中に天球面上での視野が回転するため、図 2.3 のように視野中心から外れた領域の星像が回転する。

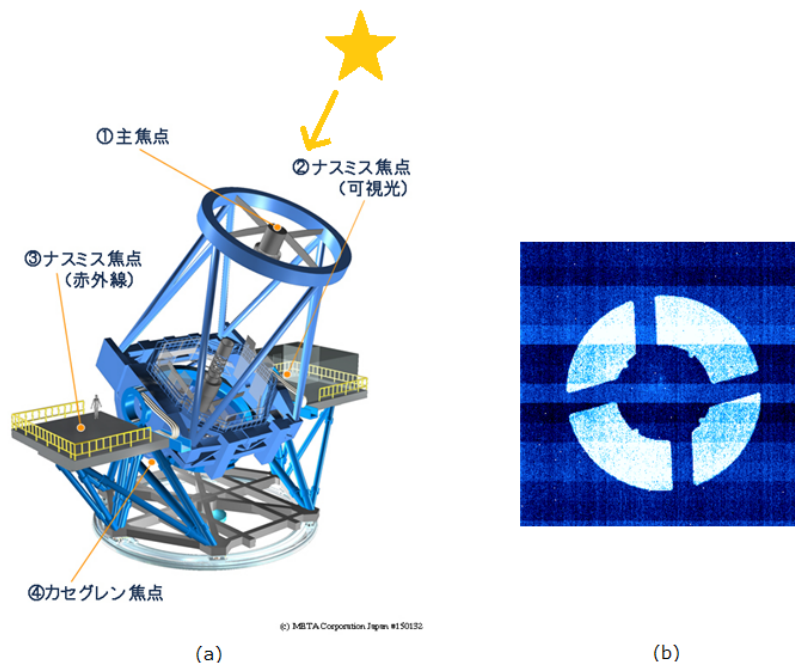


図 2.4: (a) すばる望遠鏡模式図 (b) スパイダーパターン

2.3 コロナグラフ

コロナグラフとは、観測時に遮光円盤によって中心星の放射を遮り、中心星近傍の太陽系外惑星や原始惑星系円盤などを観測するために用いられる装置である。

HiCIAO では、188 素子波面補償光学装置 (AO188) で補正された光のうち、中心星の光は焦点面に置かれた遮光円盤によって遮光される。次に、リオストップ¹を通過することで周りの回折や散乱を抑える。これらを通して、最終的には中心星の光を抑えた光が検出される。(図 2.5(b)(c) は、コロナグラフで原始星を観測した時の模式図である。黄色の矢印は中心星の放射、青の矢印は円盤散乱光を示している。)

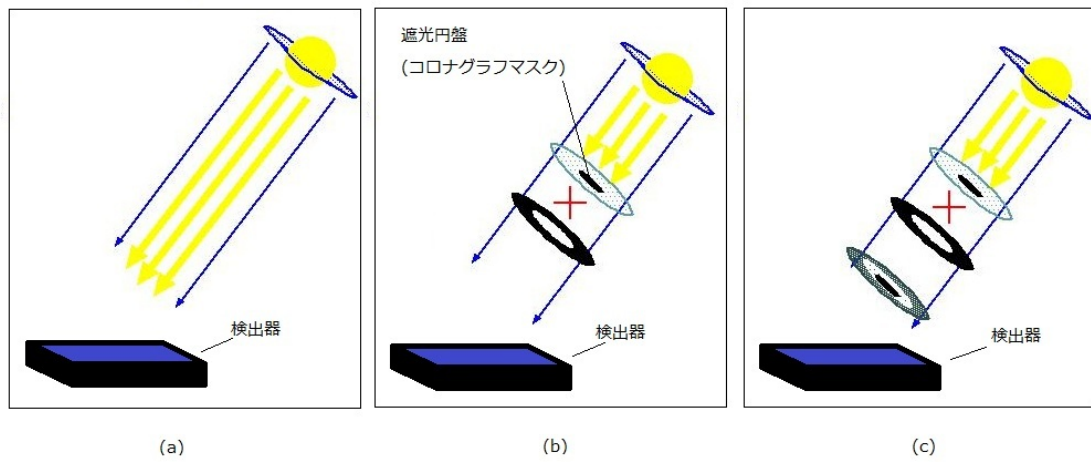


図 2.5: (a) コロナグラフを使わずに直接撮像 (b) 中心星を遮光円盤で遮断 (c) リオストップでマスク付近の回折を抑えて最終的に検出される光

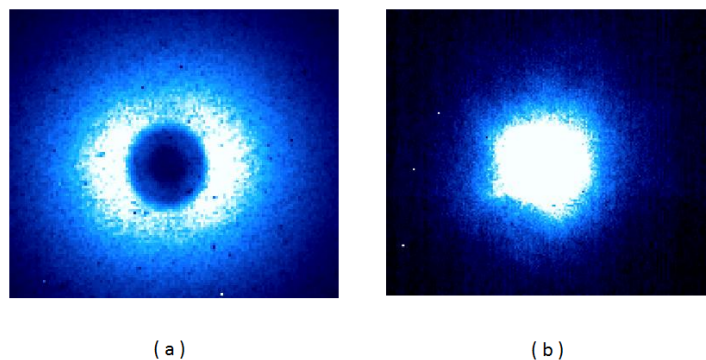


図 2.6: (a) 中心星を遮光円盤で遮断した時に得られた画像 (b) コロナグラフを使わずに直接撮像した場合に得られた画像

¹ リオストップとは、コロナグラフマスクを通過する際にその縁で起こる回折光を遮断する装置である

2.4 HiCIAO

すばる望遠鏡には、2001 年より専用コロナグラフ装置 (CIAO) が設置されていた。CIAO と比較し、コロナグラフの機能の向上はもちろん、様々な差分撮像光学 (分光観測、偏光観測、角度差分撮像法といった、いずれも明るい恒星からの光の影響を低減する手法) の技術も同時に利用できるように開発されたのが、新装置 HiCIAO である。

HiCIAO (ハイチャオ) は高コントラストコロナグラフ撮像装置 (High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics) の略称である。赤外側のナスマス焦点 (2.4a) に設置され、2008 年 12 月に大気揺らぎをリアルタイムで補正する、補償光学装置 AO188 との組み合わせでのファーストライトに成功した。従来のコロナグラフのほか、差分撮像光学系により大気揺らぎによる星像ノイズの低減機構、世界最大級 (2048×2048 素子) の赤外線 CMOS アレイ検出器を備えた赤外線観測装置である。

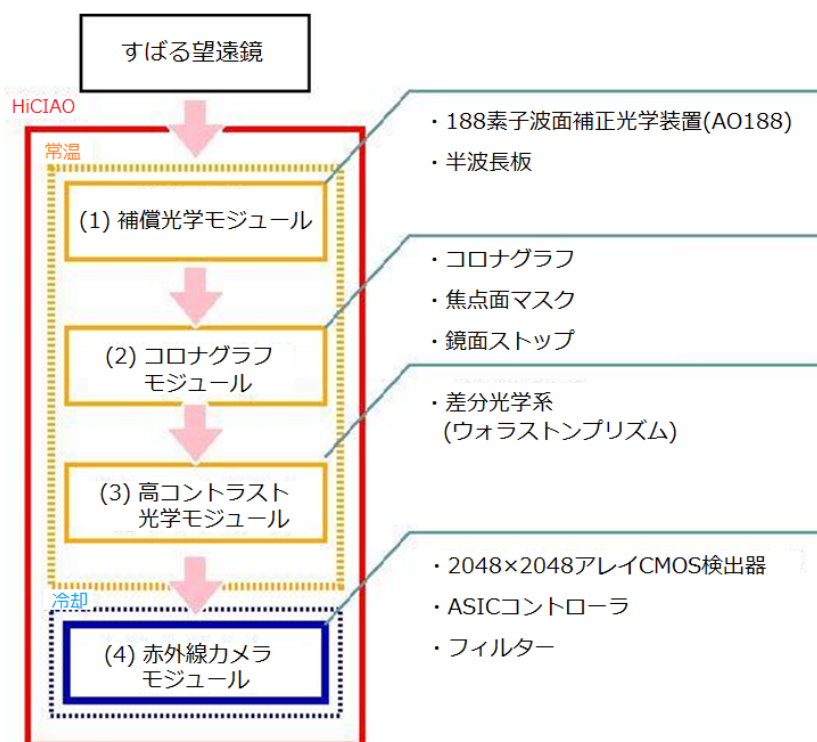


図 2.7: HiCIAO 概念図

以下では、すばる望遠鏡を通過した光が HiCIAO でどのように検出されるかを円盤散乱光を例にあげて簡単に説明する。

はじめに、望遠鏡に入射した光 (中心星の光+散乱光) は、図 2.7 の (1) に示す補償光学モジュールにおいて、大気を通過する際に歪んだ波面が補正される。そして更に、半波長板を通過することで直線偏光の偏光角が回転させられる。次に (2) のコロナグラフモジュールで、中心星放射の大部

分が遮光円盤によって遮断され、更にリオストップで光学散乱が抑えられる。そして光を (3) の高コントラスト光学モジュールのウォラストンプリズムを通過させることで、垂直成分と水平成分に分ける。この 2 成分に分けられた光がそれぞれ (4) の 2048×2048 ピクセルの検出器の左右 (1024×2048 ピクセル) で検出される。以上が、HiCIAO 内部を通過する光の簡単な流れである。次に以下で、各モジュールについて詳しく説明していく。

2.4.1 補償光学モジュール

補償光学モジュールは、以下の 3 つの部分で構成されている。

1. 188 素子波面補償光学装置 (AO188)
2. レーザーガイド星生成システム
3. 半波長板

上記の 1, 2 は補償光学の機能を実現し、3 は直線偏光の偏光角を回転させる装置である。

はじめに 1, 2 について説明する。すばる望遠鏡の 8.2m の口径における回折限界は波長 $2\mu\text{m}$ で 0.06 秒角に相当する。しかし大気揺らぎが原因で、自然シーイング下での解像度は 0.6 秒角程度にまで悪くなってしまう。補償光学はこれを解決するため、大気揺らぎによる像の劣化を補正し、すばる望遠鏡の解像度をその理論限界 (0.06 秒角) にまで高める目的で使用される。

補償光学を担う基本的な装置は、188 素子波面補償光学装置 (AO188) である。AO188 は、観測時にガイド星 (観測天体と同じ視野内にあり、明るく光度がわかっている天体) を可視光で対象天体と同時に観測し、そこから大気の揺らぎによって乱れた波面を見積り、188 枚の変形状ミラーの形を光の波面の乱れが打ち消されるように変形させることで、リアルタイムで乱れた波面を平面波に近づけるように補正する。しかし、ガイド星が観測対象天体付近に存在する領域 (全天の 1 %) 以外では、この方法を用いることはできない。ガイド星が存在しない領域を観測する場合は、AO188 と共に、レーザーガイド星生成システムを用いる。レーザーガイド星生成システムとは、地上から高度 90km の上層大気に向けて、ナトリウム D2 線 ($\lambda = 589\text{nm}$) にチューニングした高出力レーザーを照射し、上層大気中にあるナトリウム層のナトリウム原子を発光させて、人工的にガイド星を作る装置である。これによってガイド星が付近にない天体でも大気揺らぎの補正ができ、どんな観測領域においても高解像度での観測が可能である。

次に、3 の半波長板の効果について説明する。波長板とは、一般に直交する偏光成分の間に位相差を生じさせる複屈折素子を指し、中でも生じさせる位相差が π のものを半波長板と呼ぶ。半波長板には光軸と呼ばれる軸が定義されており、半波長板を通過する電磁波のうち、光軸に直交する電磁波の成分の位相を遅らせる (もしくは早める) ことで、 π の位相差を生じさせる。半波長板を通過した光は、入射前に比べて偏光角を回転させられる。以下では、入射光が半波長板を通過して検出器で検出される状況を想定したときに、入射光に生じる変化について説明する 図 (2.8)。

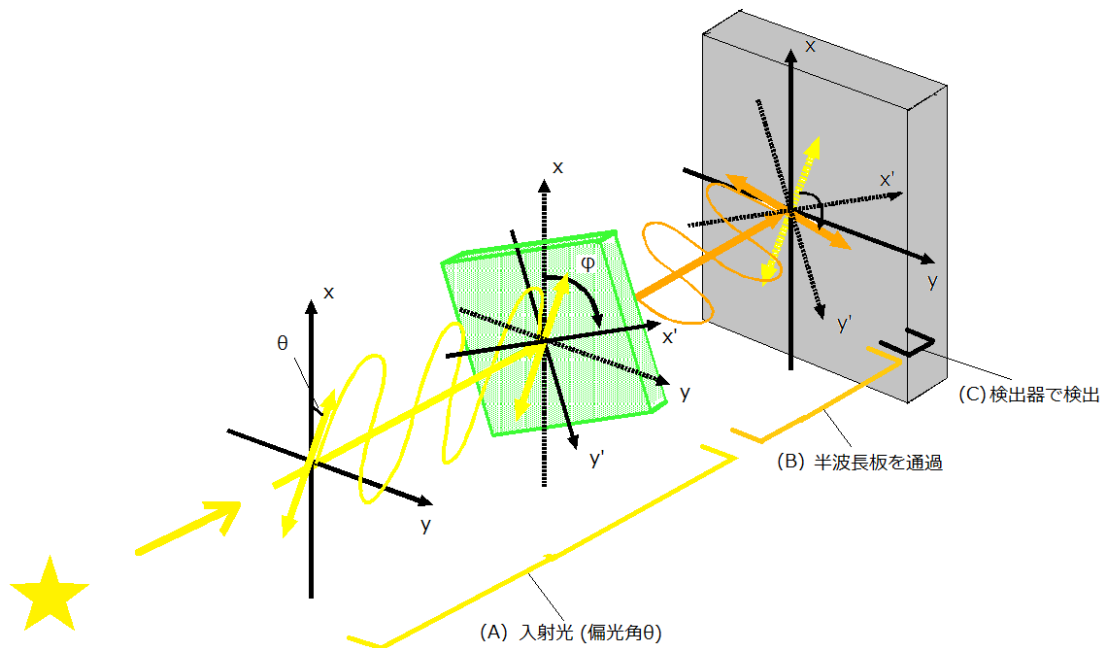


図 2.8: (A) 入射光の入射 (B) 入射光が半波長板を通過 (C) 検出器で検出

図 2.8(A) の段階では、直線偏光している入射光が半波長板に到達するまでを表している。この時、(A) の $x y$ 座標系は天球面上の北の向きを x 軸、西の向きを y 軸とした座標系である。また入射光の偏光角は、 x 軸から y 軸方向へ θ だけ傾いているとする。次に図 2.8(B) では、入射光が半波長板を通過する段階を示している。ここで半波長板の光軸を x' 軸にとるように、 $x' y'$ 座標系を設定している。この時、 x' 軸は x 軸から y 軸方向へ ϕ だけ傾いているとする（ここでの ϕ は、半波長板の角度に対応する）。更に図 2.8(C) の段階では、入射光が半波長板を通過し、検出器で検出される状態を示している。この時回転した入射光は、天球面上に定義した $x y$ 座標に射影した成分として検出される。

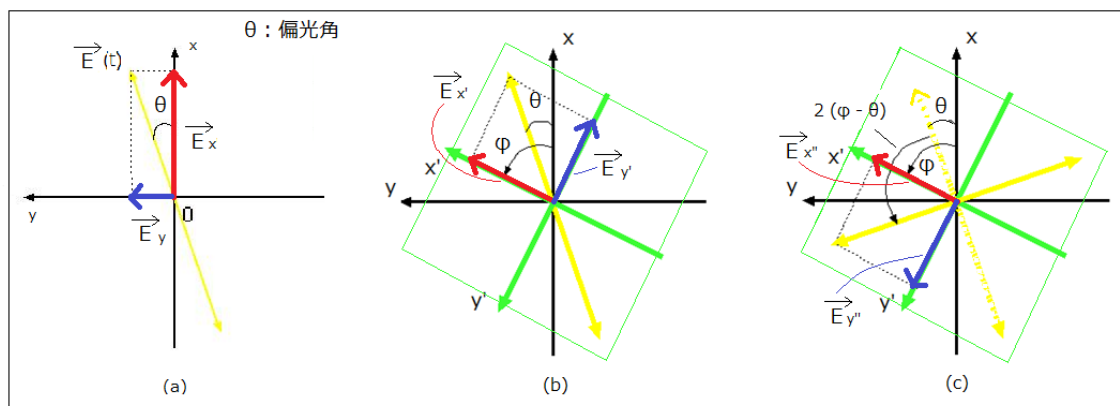


図 2.9: 半波長板の効果

図 2.9(a) は、偏光角 θ の向きに直線偏光している入射光を観測者側から見た向きで描いた図である。この時入射光を $x y$ 座標系に射影すると、各成分は式 (2.16) のように書くことができる。

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = E(t) \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}, \quad (2.16)$$

図 2.9(a) から更に時間を進め、光が半波長板に到達した状態を示した図が図 2.9(b) である。図 2.9(b) には半波長板の光軸の向きが x' 軸となるように $x'y'$ 座標を記述し、入射光電場の x' 成分を $E_{x'}$ 、 y' 軸成分を $E_{y'}$ とした。この時、 $E_{x'}$ と $E_{y'}$ は式 (2.17) のように書くことができる。

$$\begin{pmatrix} E_{x'} \\ E_{y'} \end{pmatrix} = E(t) \begin{pmatrix} \cos(\phi - \theta) \\ -\sin(\phi - \theta) \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

次に図 2.9(c) では光が半波長板を通過し、変化した後の偏光光を表している。上記したように、半波長板は光軸に直交する光の成分の位相を遅らせる装置であるので、ここでは式 (2.17) の $E_{y'}$ の位相を遅らせることで電場の位相差を π にすることに相当する。半波長板を通過した後の光の x' 成分を $E_{x''}$ 、 y' 軸成分を $E_{y''}$ とすると、式 (2.18) のように書くことができる。

$$\begin{pmatrix} E_{x''} \\ E_{y''} \end{pmatrix} = E(t) \begin{pmatrix} \cos(\phi - \theta) \\ -\sin((\phi - \theta) - \pi) \end{pmatrix}, \quad (2.18)$$

この時、 x' 成分は変化しない。更に、半波長板通過前 (式 (2.17)) と、半波長板通過後 (式 (2.18)) で入射光の偏光角の変化量を ψ とし、どの程度回転するかを以下に示した。

$$\begin{aligned} E(t) \begin{pmatrix} \cos(\phi - \theta) \\ -\sin((\phi - \theta) - \pi) \end{pmatrix} &= E(t) \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\phi - \theta) \\ -\sin(\phi - \theta) \end{pmatrix}, \\ E(t) \begin{pmatrix} \cos(\phi - \theta) \\ \sin(\phi - \theta) \end{pmatrix} &= E(t) \begin{pmatrix} \cos(\psi - (\phi - \theta)) \\ \sin(\psi - (\phi - \theta)) \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2.19)$$

式 (2.19) より、 $\psi = 2(\phi - \theta)$ であることがわかった。更に、 xy 座標系ではどのように変化したかを調べるために式 (2.18) を xy 座標系に射影すると、式 (2.20) と書くことができる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} E_{x''} \\ E_{y''} \end{pmatrix} &= E(t) \begin{pmatrix} \cos(2\phi - \theta) \\ -\sin(2\phi - \theta) \end{pmatrix}, \\ &= E(t) \begin{pmatrix} \cos 2\phi & \sin 2\phi \\ -\sin 2\phi & \cos 2\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}, \\ &= \begin{pmatrix} \cos 2\phi & \sin 2\phi \\ -\sin 2\phi & \cos 2\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

これより、 xy 座標系においては、時計回りに 2ϕ 回転したことがわかる。

2.4.2 コロナグラフモジュール

コロナグラフモジュールは、以下の3つの部位で構成される。

1. コロナグラフ
2. 焦点面マスク
3. リオストップ

原始惑星系円盤や系外惑星の観測において重要な問題は、観測対象天体近傍に、対象天体に比べて非常に明るい中心星が存在することである。原始惑星系円盤は中心星の周囲に分布しているので、中心星も同じ観測視野内で観測される。中心星の放射は数千 K ~ 数万 K の黒体放射であるので、数秒の露光時間で検出器が飽和する。それに対し、円盤散乱光は非常に微弱であるので、数秒の観測時間では検出するために不十分である。よって中心星の放射を遮断し、抑制する必要がある。このために使われる装置がコロナグラフである。コロナグラフの説明は §2.3 に明記したので、ここでは割愛する。

2.4.3 高コントラスト光学モジュール

1. 差分光学系
 - DI(直接撮像法)
 - SDI(分光観測法)
 - PDI(偏光差分撮像法)
 - ADI(角差分撮像法)

2. ウォルストンプリズム

はじめに、差分光学系について説明する。HiCIAO では、無偏光成分やノイズを効率的に除去するために、1 の4つの観測方法を目的に応じて選択できる。更に、ADI(角差分撮像法) は他の3つのモードと組み合わせての観測も可能である。本観測は、PDI + ADI モードを選択して観測されている。PDI モードと ADI モードについての説明は、§2.2.1 と §2.2.2 に記した通りである。

次に、ウォルストンプリズムについて説明する。偏光観測では、入射光を直交する2成分に分離して観測する。そのために使用されるものを一般には偏光子と呼ぶ。中でも HiCIAO で使用されている偏光子は、ウォルストンプリズムと呼ばれるものである。このプリズムは直交する直線偏光した光を同時に取得することができる (図 2.10)。

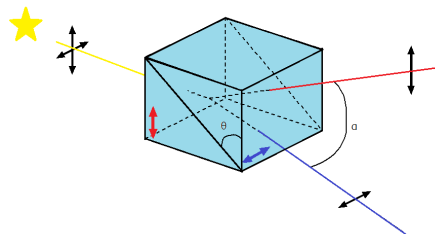


図 2.10: ウォルストンプリズム

2.4.4 HiCIAO 概略図

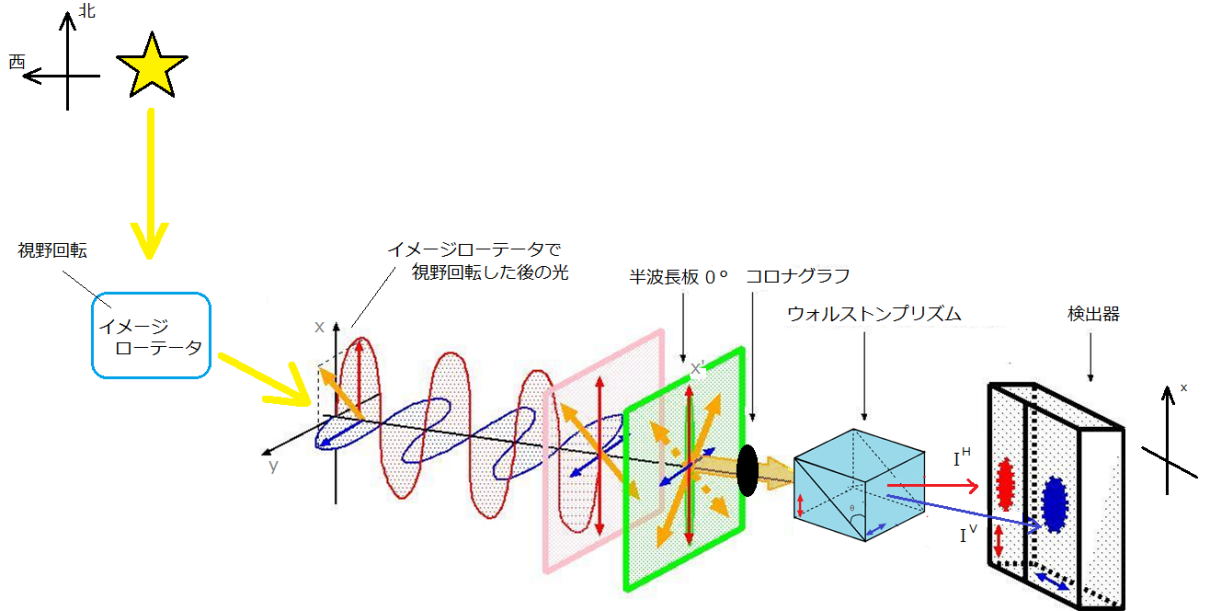


図 2.11: HiCIAO 光学系模式図 1

図 2.11 は、光が HiCIAO 内部を通して検出器で検出されるまでを簡略化して示したものである。上記した通り、光は半波長板 (ここでは 0 度) を通過して偏光角を変えられ、コロナグラフマスクで中心星の光を遮断され、ウォルストンプリズムで垂直成分 (I_θ^H) と水平成分 (I_θ^V) に分けられて検出される。ここで HiCIAO 特有の注目すべき点は、垂直成分と水平成分の両方を、同時に検出器の左右 (各 1024×2048 ピクセル) で検出できるという点である (図 2.13)。これにより両者の差分を取ることで、時間変動するノイズ (大気揺らぎ、光学系、中心星のマスクの漏れだしの形) を最小限におさえることができる。

式 (2.5) より、ストークスパラメータ Q は、 $I_0^H - I_0^V$ を計算することで求められる。同時刻に垂直成分と水平成分を検出しているため、ノイズや中心星のマスクからの漏れだしは、 Q を計算する時にキャンセルされる。これは、 U に関しても同様である。

次に、半波長板の角度を 0 度と 45 度にした場合の簡略図を図 2.12 に示した。上部の図が 0 度、下部の図が 45 度のときを示している。

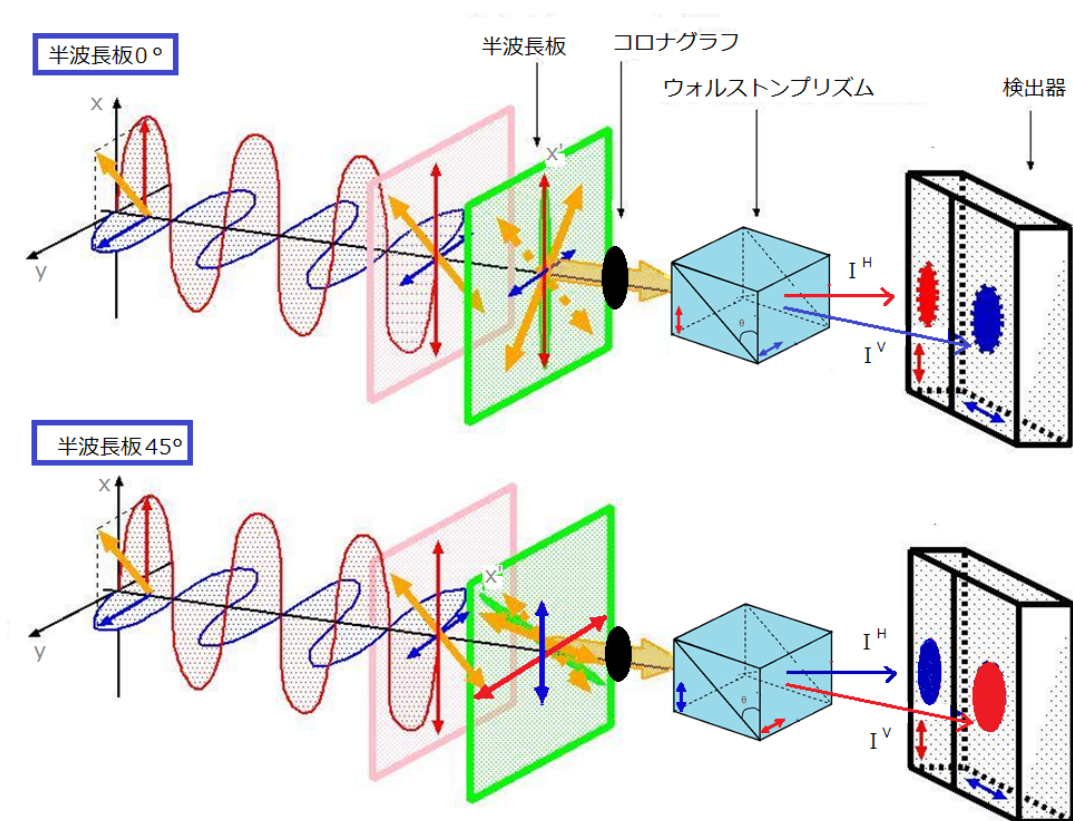


図 2.12: HiCIAO 光学系模式図 2 :半波長板 0 度と 45 度

ここで示されるのは、波長板 0 度を通した時に検出器の左側で撮られていた光は、波長板 45 度にした時には右側で検出される。つまり、波長板 0 度を通した光では $I_0^H - I_0^V$ を行って Q を作ったが、波長板 45 度を通した光では同様の操作を行って $-Q$ を計算することができる。この後、更に $Q - (-Q)$ を行くと、 $2Q$ となり、 Q の S/N を上げることができると同時に、検出器特有のノイズはこの時にキャンセルすることができる。

このため、HiCIAO では円盤や惑星などの暗い天体の高精度な検出を行うことが可能である。

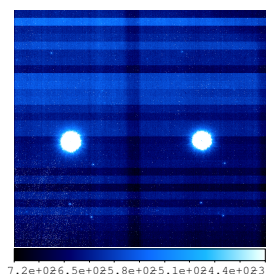


図 2.13: HiCIAO で検出されたデータ

第3章 HiCIAO を用いた HD 169142 観測

3.1 対象天体 HD 169142

HD 169142 は、太陽系から 145 pc の距離に位置する中質量前主系列星である。質量は $2.0 M_{\odot}$ ($\sim 2.5 M_{\odot}$) であり、スペクトル型は A8 Ve の Herbig Ae star である。過去の観測から、傾き角が約 13° 、長軸方向の位置角が約 5° 、半径 $1.4''$ に広がった原始惑星系円盤を持つことが明らかになっており、その円盤の熱放射強度 ($1.1\mu\text{m}$) は、 $\propto r^{-3}$ に従うと考えられている [8]。円盤質量は、 $(0.6 \sim 3.0) \times 10^{-2} M_{\odot}$ と見積もられており、構造物質の比は、(ガス質量) / (ダスト質量) = 100 程度の、ガス散逸前の円盤である [9]。また、円盤熱放射のスペクトルエネルギー分布から、星の周囲に半径 $0.15''$ 程度の“穴”の存在が示唆されていた。

今回の観測は、HD 169142 の原始惑星系円盤の空間構造の検証が目的である。そのため、円盤を伴っていない天体 (PSF 標準星) との比較が必要である。PSF 標準星は HD 166903 を用いた。

天体名	J バンド等級	H バンド等級	K バンド等級	V バンド等級	R バンド等級
HD 169142	7.310	6.911	6.410	8.15	8.2
PSF 標準星	6.515	5.837	5.632	10.4	8.95

表 3.1: HD 169142 と HD 166903 の近赤外線と可視光の絶対等級 (出典 : <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>)

3.2 観測データ

HD 169142 と HD 166903 (PSF 標準星) の観測時の情報を表 3.2 に記載した。また、観測データのデータ解析に使用したファイル名を表 3.3 にまとめた。

観測天体名	HD 169142	HD 166903 (PSF 標準星)
観測日	2011.5.23	2011.5.23
観測時間	1:53~3:13	3:15~3:50
観測モード	PDI+ADI モード	PDI+ADI モード
観測波長域	H バンド ($1.65\mu\text{m}$)	H バンド ($1.65\mu\text{m}$)
フレーム 1 枚の露光時間	30 秒	15 秒
フレーム枚数	40 枚	48 枚
コロナグラフィマスクサイズ	直径 $0.3''$	直径 $0.3''$

表 3.2: 観測諸元

HD169142	HICA00055151.fits ~ HICA00055252.fits (PDI cycle 55173~)
HD166903(HD169142 PSFref)	HICA00055253.fits ~ HICA00055312.fits (PDI cycle 55265~)
フラット ランプオン	HICA00051743.fits ~ HICA00051751.fits
ダーク 露光時間 30 秒	HICA70006914.fits ~ HICA70007013.fits
ダーク 露光時間 15 秒	HICA70006714.fits ~ HICA70006813.fits
天球上ゆがみ補正用フレーム	ch1_20110521.db ch1_20110521.coo (左用)
	ch2_20110521.db ch2_20110521.coo (右用)

表 3.3: 解析で使したファイル群

PDI 観測では観測時に、半波長板の角度を 0 度、45 度、22.5 度、67.5 度とまわして、各角度で通過してきた光を、それぞれ 1 回の観測として行う。HD 169142 の観測では 0 度、45 度、22.5 度、67.5 度の観測サイクルを 10 回行った。

3.3 解析の流れ

本解析の大まかな流れを図 3.1 に示した。§3.3.1 からは、項目ごとに詳しく説明する。

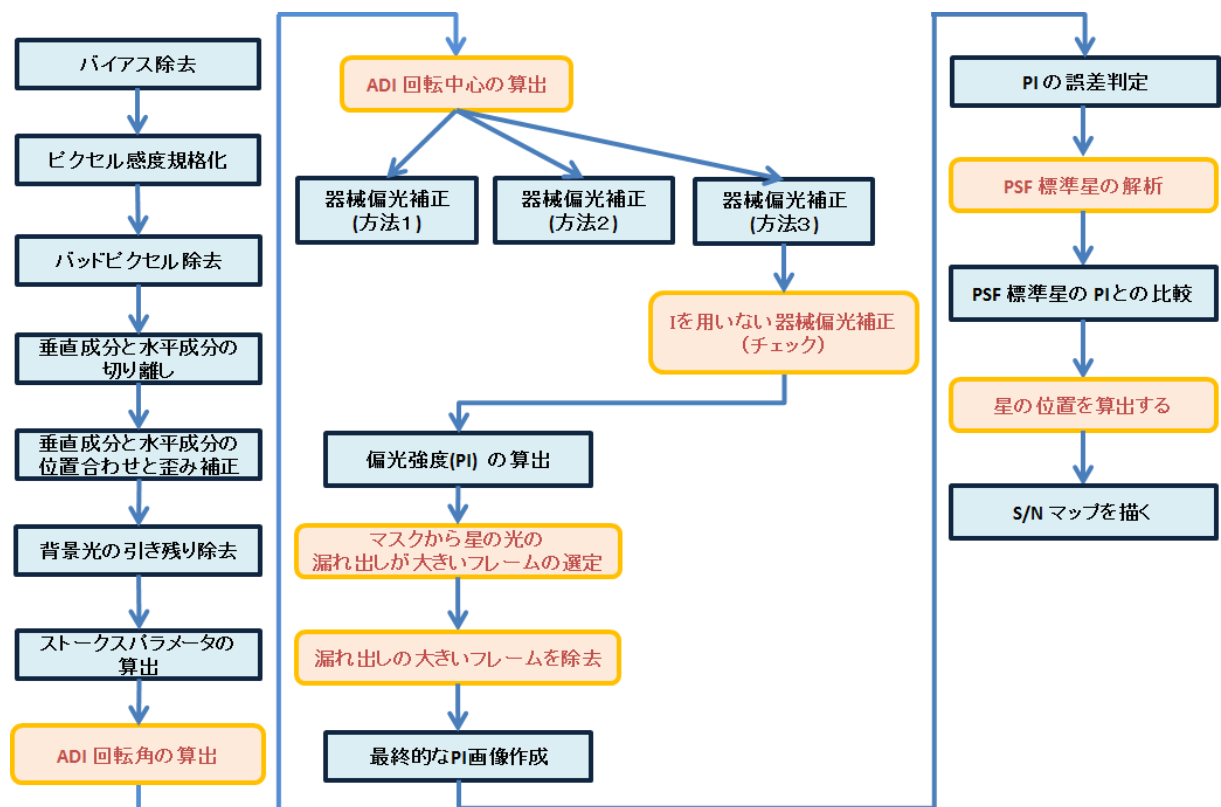


図 3.1: 本解析の流れ

3.3.1 バイアス除去

バイアスとは、露出時間 0 秒で露光せずに読み出した値のことを指し、理想的にはこの出力値は 0 となるべきである。しかし実際には、アレイ検出器の各画素から電荷を電圧に変換して読み出す際に付加されるバイアス (読み出しノイズ) が検出される。この読み出しノイズは、図 3.2(a) の HiCIAO で取得された HD 169142 の生データのフレーム全域に存在する、縦横の縞となって現れる。横縞は全て、 2048×64 ピクセルの領域毎に等間隔で現れる。検出器のサイズは 2048×2048 ピクセルであるので、32 本の横縞になる (図 3.2b)。これに対し、縦縞は縞の間隔が等間隔ではなくランダムな幅で現れる。以下では、読み出しのノイズの成因について説明し、その後で縞の除去法について説明する。説明の際、“横縞”と“縦縞”は読み出しノイズの横縞と縦縞という意味で使用する。

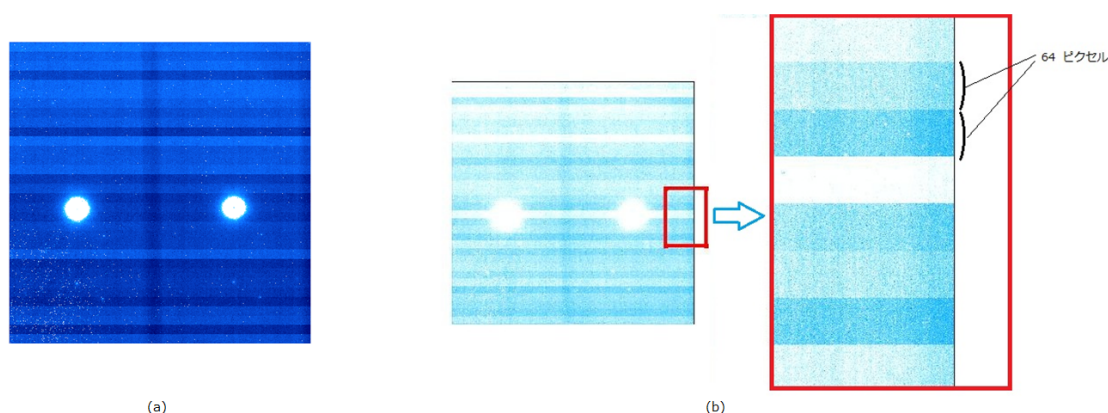
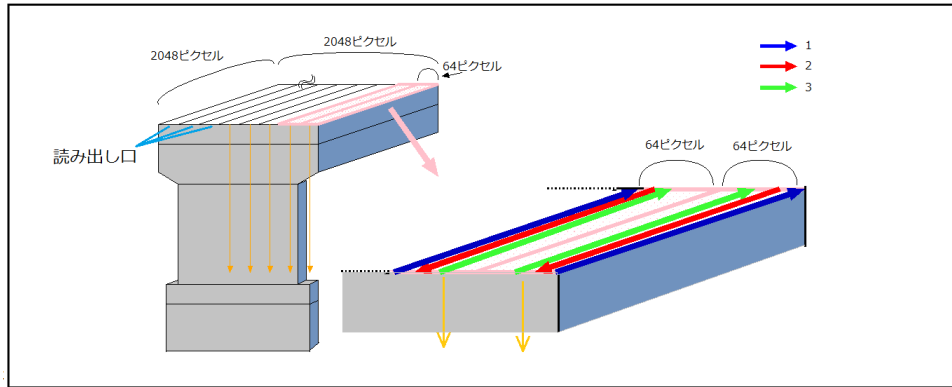


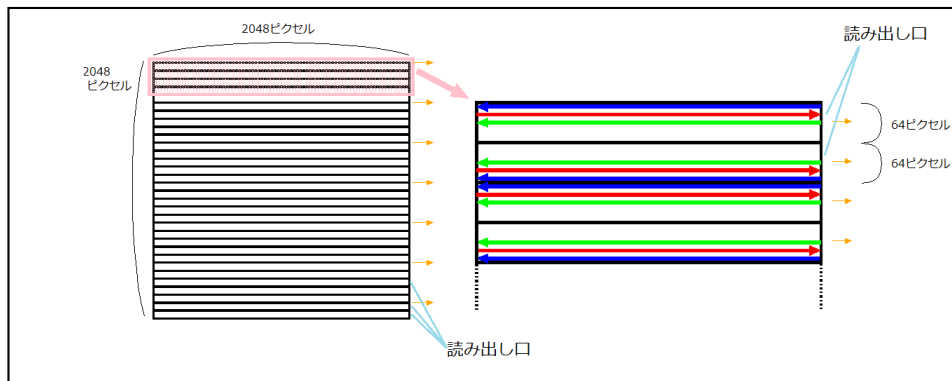
図 3.2: (a) 生データ (b)64 ピクセル感覚のバイアス横縞

横縞の原因は、検出器の読み出しが横縞を構成するブロックごとで行われるためである。これを説明するために、以下では検出器の読み出し方について説明をする。図 3.3(a)(b) は、検出器の読み出し方を示したものである。

HiCIAO の検出器は、 2048×2048 ピクセルで構成される、CMOS アレイ検出器である。この検出器の読み出し口は、図 3.3 で示すようにある一辺に 32 箇所設置されており、それぞれから読み出しを行う。このため横縞は、64 ピクセルの領域毎に等間隔で 32 本の縞が現れる。一方縦縞の原因は、読み出しノイズが時間変動するためである。この結果、縦縞はランダムに現れる。さらに、横縞を作っているブロックは、奇数本目と偶数本目で検出器の読み出しの順が異なる (図 3.3 で示すように、奇数本目のブロックの読み出し方が上から下なのに対し、偶数本目は下から上)。そのため奇数本目と偶数本目では、各ブロック内で異なる位置の画素が、同時刻に読み出されている。縦縞の除去を行う際に、この点も考慮することが必要である。



(a)



(b)

図 3.3: 検出器 (CMOS) の読み出し方 (b) 上から見た図

次に、縞の除去方法を説明する．はじめに、横縞の除去について記述する．横縞を除去するため、HiCIAO ではあらかじめオーバースキャン領域のデータを取っている．オーバースキャンとは、0 秒読み出しを行ったことに相当するデータ (ダーク) を撮る領域である．あらかじめ検出器の四方 4 ピクセルの部分にマスクをかけ、天体の検出には使用せずに 0 秒読み出しの値を補完する．(オーバースキャンの位置は図 3.4 a b)．このダークの値 (中間値または平均値) を引くことでバイアス縞を除去する．ただし補完されたダークの値も、読み出す際に上記の読み出しノイズを含んでいるため、横縞 (2048 × 64 ピクセル) 毎に異なるダークの値を引かなければならない．縞の左右 4 × 64 ピクセルの範囲のダークの値の平均値、または中間値をその縞から差し引くことで、横縞を除去する．

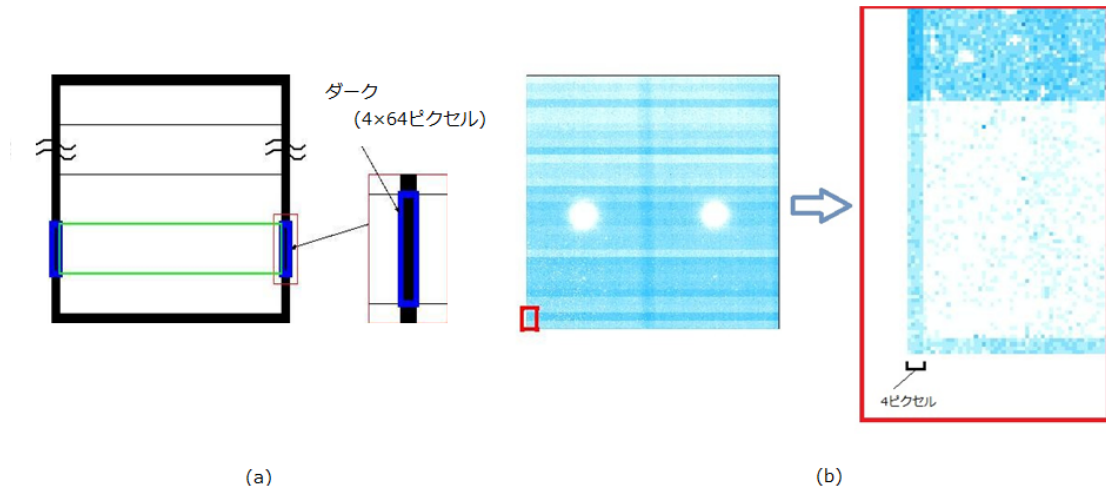


図 3.4: (a) 補完されているダークの位置の模式図 (b) 生データのダークの位置

横縞除去のあと、縦縞を除去する。縦縞の原因は、読み出しの際の時間変動であるので、読み出した時刻が同じ画素に同じノイズが載っていると考えられる。つまり、奇数本目と偶数本目のブロック毎に適切な値を差し引くことで、縦縞を除去することができる。

具体的な縞取りの手順を以下に述べる (図 3.5)。

1. 2048×64 ピクセルの縞の左右 4×64 ピクセルに補完されたダークの中間値 (縞の取れ具合によっては平均値) を縞毎に計算する。
2. 計算した値を各縞から引くことで横縞を除去する。
3. 横縞の天体の光が写っていない領域の、偶数本目のブロックと奇数本目のブロックをそれぞれ平均化する (各ブロックは 2048×64 ピクセル)。
4. 3 で作成した平均化したブロックを偶奇交互に貼り合わせ、縦縞除去用フレームを作る (図 3.5)。
5. 各横縞を除去した後の各サイエンスフレーム¹から縦縞除去用フレームを差し引く事で、縦縞を除去する。

¹HD 169142 の観測データ

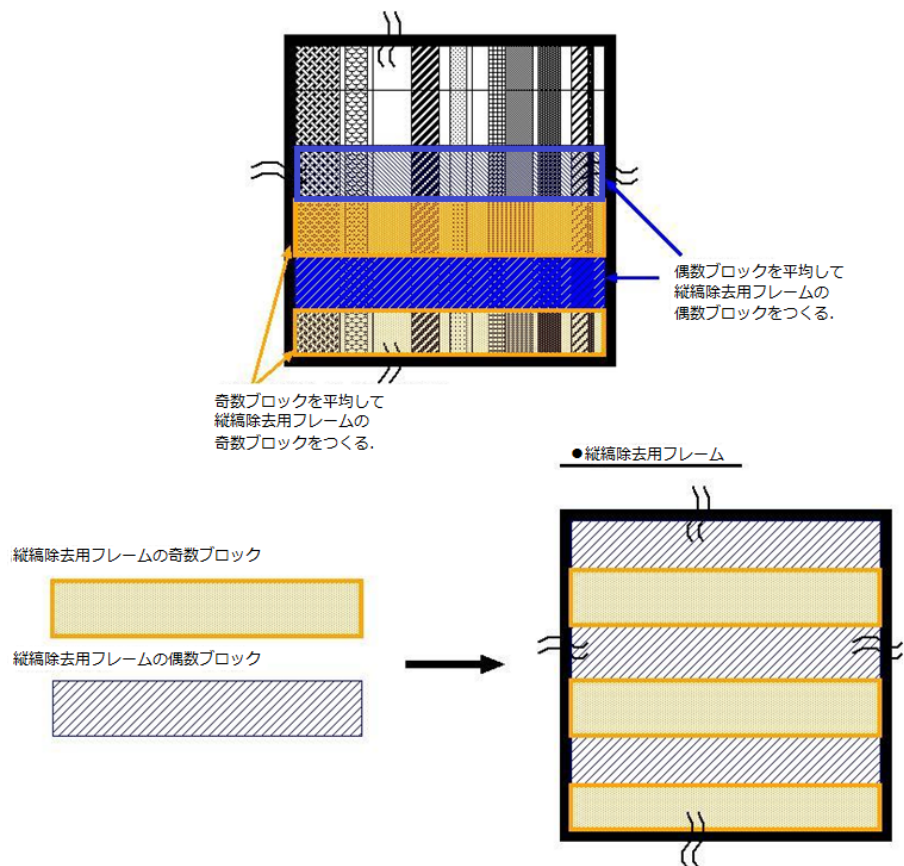


図 3.5: 縦縞除去用フレームの作り方

この方法で縞が取れない場合は、大気による波面の揺らぎが良く補正されておらず、縞の原因になっていると考えられる。その場合は各横縞毎のスカイの値 (天体の写っていない領域 (図 3.6)) を測ってその値を引く。ただし、HD 169142 の観測条件がよかったのにも関わらず、ダークを引いただけでは縞が残ったので、今回はスカイの値を測って縞を除去するプログラムを使用し (芝井広 大阪大学教授作), バイアス除去を行った。

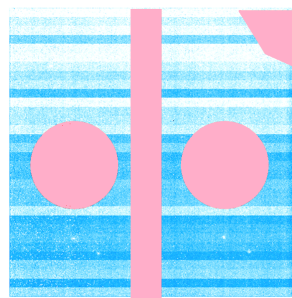


図 3.6: ピンク色で囲んだ部分以外のスカイを各縞毎に測る

上記の方法でバイアスを除去した前後の変化を、図 3.7(a)(b) に示した。

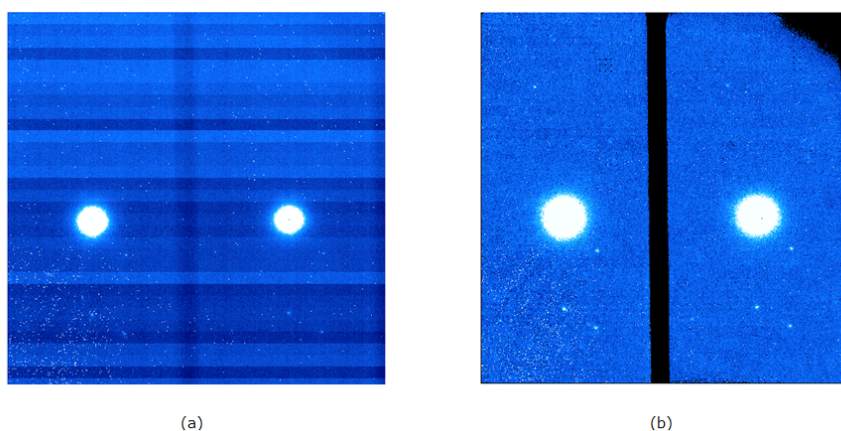


図 3.7: (a)HD169142 生データ (b) (a) の縞を除去

3.3.2 ピクセル感度の規格化

検出器のピクセルは、各ピクセル毎に感度が一定ではない。また、HiCIAO で光を垂直成分と水平成分に分けて検出器で検出する際、両成分の強度が異なって検出される (ウォルストンプリズムを通過する時には各成分 49 % ずつに分けられるが、その後検出される前に減光する) などの、光学系の非一様性が存在する。これらを補正するために、フラットフレーム (一様な光度を一定時間検出したフレームから作成) で規格化する。天体の観測時にフラット画像が取得されている。今回の観測では、ドームフラットというすばる望遠鏡のドームを閉め、ドームに様に光をあてて、その光を観測したフラットデータを使用している。

フラットフレームの作成は、以下の通りに行った。

1. フラットフレームのバイアス縞を引く。
SEEDS 用に作成された標準的なツール (橋本 淳 国立天文台研究員作) を用いて、ダークを引いてバイアス縞を除去した。
2. 各フラットフレームの数値をチェックする。
フレームを表示させ、異常値を示すフレームが混じっていないかを確認した (フラットフレームは複数枚撮られているので、もし異常値があるフレームがあった場合はそのフレームを取り除くが、今回は異常値があるフレームは無かったので、全てのフレームを使用した)。
3. 各フレームを平均化する。
今回はフレーム 9 枚を、中間値で平均化した。
4. 平均化したフレームの平均値を測る。
平均化したフラットフレームのフレーム全体での平均値を測った。この結果、今回は 18751 という平均値を得た。
5. フラットフレームを規格化する。
平均化したフラットフレームを先ほど求めた 18751 で割って規格化を行った。この作業は、

サイエンスフレーム上の天体からの光によるピクセル値をなるべく保存するために、フラットフレームの典型値を 1 にする目的で行った。

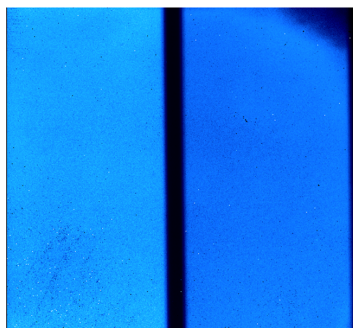


図 3.8: 作成したフラットフレーム

上記の方法で作成したフラットフレームを使用し、サイエンスフレームのピクセル感度を規格化した。各サイエンスフレームをフラットフレームで割れば良い (図 3.9)。

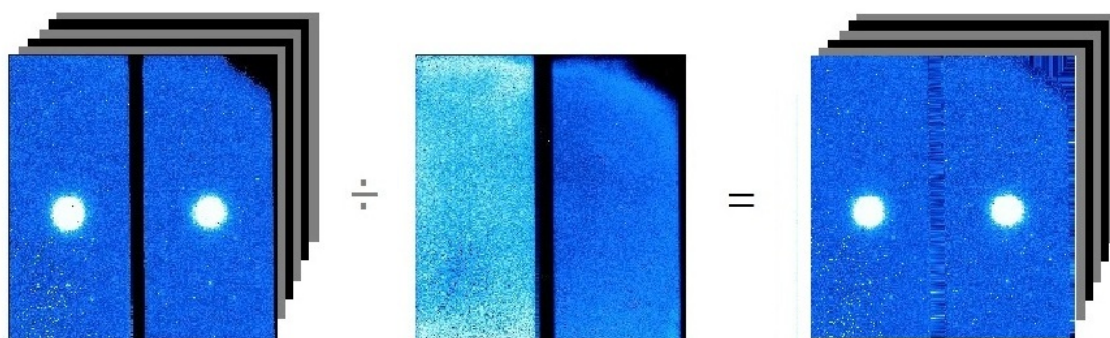


図 3.9: ピクセル感度の規格化

3.3.3 バッドピクセルの除去

バッドピクセルとは、検出器上のピクセルのうち、壊れて異常値を返すピクセル (出力なしなど) や、放射線起源のノイズ等が混入したピクセルのことである。このピクセルが混ざっていると、天体の光の強度を正しく測ることができない。このため、バッドピクセルを除去する必要がある。具体的には、以下の流れでバッドピクセルの除去を行った。ここでのバッドピクセルの判定には、ダークフレーム²を用いた。ダークフレームの全ピクセルの値は、バイアスを除去すると 0 になるべきであるが、実際には異常値を返すピクセルが混在する。ダークフレームのバイアスを除去し、ダー

²ダークフレームは、検出器全体にマスクをかけて取得するフレームである。今回使用したダークフレームの露光時間は 30 秒である。

クフレームを足しあげて (平均化) した時に、ダークフレームの各ピクセルの平均値に対して標準偏差の 3 倍の値を示すものをバッドピクセルと判定した。

1. バッドピクセルの存在する位置に正の値，それ以外のピクセルに 0 の値を入れた，バッドピクセル除去用フレームを作成する。

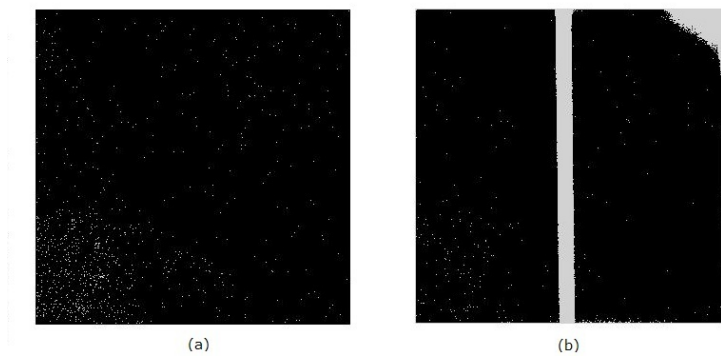


図 3.10: (a)(b) バッドピクセルの位置

2. バッドピクセル除去用フレームを使って，サイエンスフレームのバッドピクセルに 100000(異常値) という値を入れる (ピクセルにマスクをかける)。
3. マスクをかけたピクセルに，隣接する周囲 8 ピクセルの中間値を入れる。

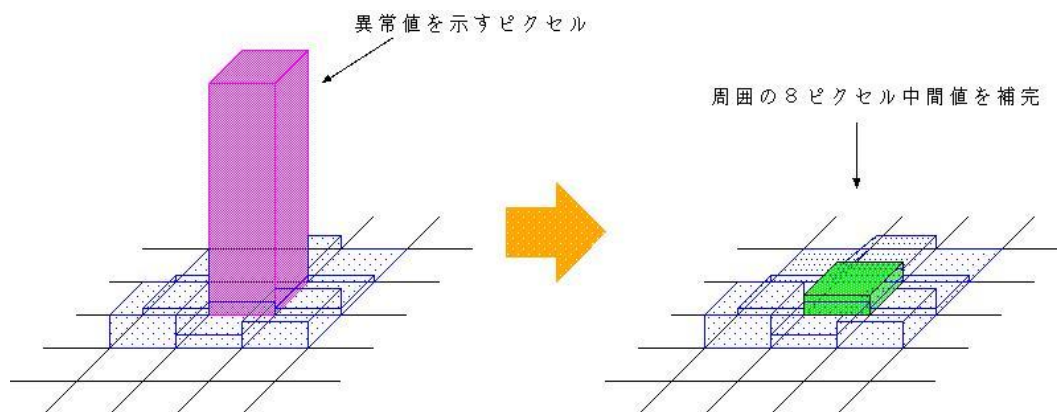


図 3.11: バッドピクセルの除去法

4. マイナス側の異常値も除去するために，(-1) をかけて，同様の作業を行う。
5. マイナスのバッドピクセル除去後は (-1) をかけてもとのデータの値に戻す。

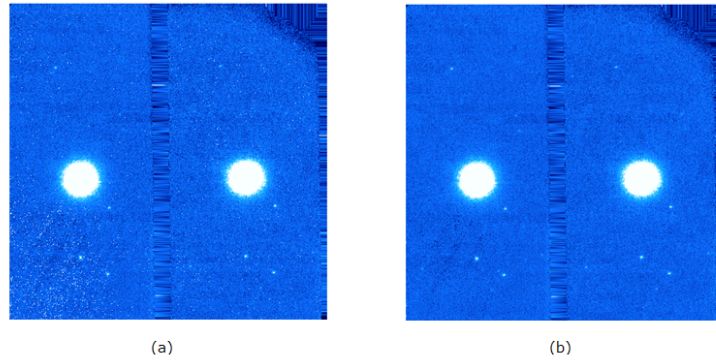


図 3.12: (a) バッドピクセル除去前 (b) 除去後

3.3.4 垂直成分と水平成分の切り離し

HiCIAO では、 2048×2048 ピクセルの検出器の左側半分で光の垂直成分 (左 1024×2048 ピクセル)、右側半分で水平成分 (右 1024×2048 ピクセル) を取得している (§2.4.4). ストークスパラメータを求めるためには、垂直成分と水平成分の演算をする必要があるので、フレームの垂直成分と水平成分を検出した部分を、2つのファイルに分けた. 具体的には、フレームの左側と右側部分をそれぞれコピーし、 1024×2048 ピクセルの大きさのフレームに貼り付けることで、垂直成分と水平成分を分離した.

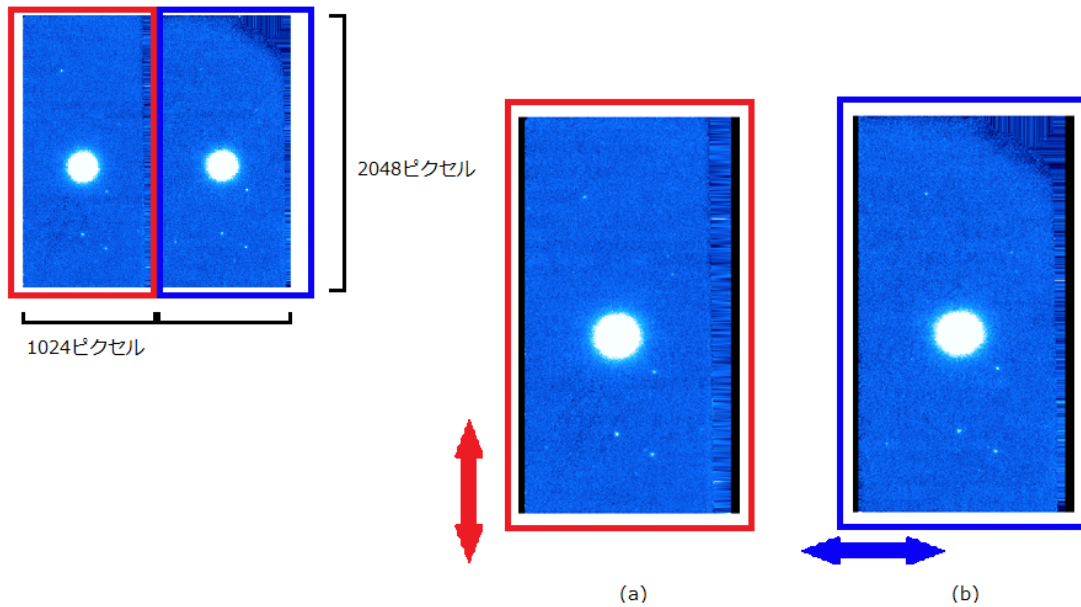


図 3.13: (a) 垂直成分 (b) 水平成分

3.3.5 左右のピクセルの位置合わせと歪み補正

ここまでで、検出した光を垂直成分と水平成分に切り分けることができた。しかしこのままの状態では、左右の画像間に相対的な位置ずれが残っている。また、天球面上の座標系が、検出器上では歪んで捉えられている。このため、左右のピクセルの位置と天球面上の歪みを補正した。SEEDS用に作成された、位置ずれと歪みを左右のピクセル間で補正するための、各ピクセルの補正量が記述されたテキストデータ³を使用した(ファイル名は表3.3に記した)。このテキストデータに補完されている値の分だけ、サイエンスフレームの各ピクセルの位置を補正する。

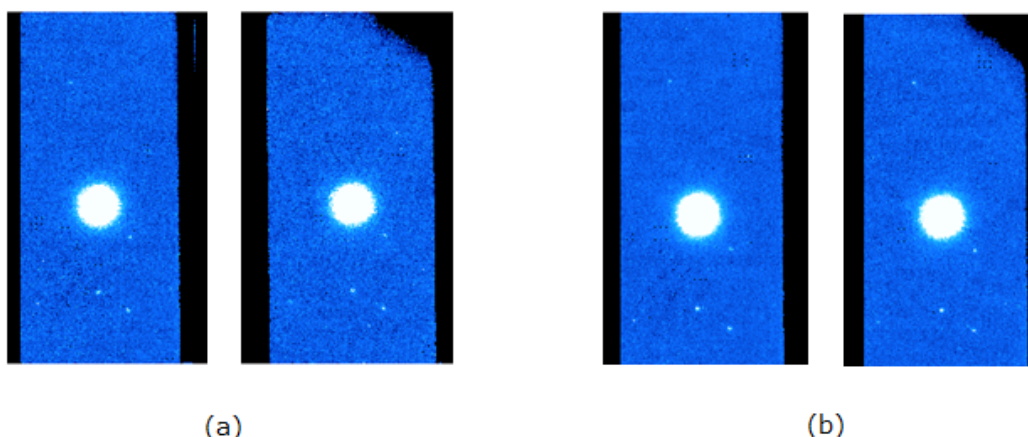


図 3.14: (a) 歪み補正をする前 (垂直成分 (左) 水平成分 (右)) (b) 歪み補正をした後 (垂直成分 (左) 水平成分 (右))

この補正は、フレームの対象天体から遠くなるほど不定性が大きい(フレームの上部と下部で $\sim 3\%$)。そのため、フレームの端の座標は中央部に比べて信頼度が低くなる。

3.3.6 背景光の引き残りの除去

この段階で、背景光のレベルは理想的には0に近い値であるはずだが、背景光の引き残りがある場合がある。(天体の写っていない領域のピクセル値を調べて確認する) 背景光に引き残りがあると、天体の正確な強度を測ることができないので、なるべくゼロに近づくように補正しておく必要がある。そのため、各左右のフレームから背景光を測ってその値を引いた。ここで、背景光を引きすぎると天体の光も引いてしまうので、引きすぎないように注意した。

背景光の引き残り除去の流れは次の通りであった。

1. 天体の光が入っていない領域を選び、背景光の中間値を測る (垂直成分と水平成分それぞれ 図 3.15)。
2. 1 で測った背景光の引き残り値を、それを測ったフレームから引く。

³星の位置関係が正確にわかっている銀河を観測し、検出器上でどの程度歪むかを測定する。この時の各ピクセル毎の補正量が補完されている。

3. 2で背景光の引き残りを除去したフレームにおいて，1で背景光の値を測った領域と同じ領域で背景光を測り，背景光の引き残りが除去できたことを確認する．

それぞれのフレームの背景光除去前のピクセル値，と除去後のピクセル値 (平均値) を比較した結果を表 3.4 に示した．

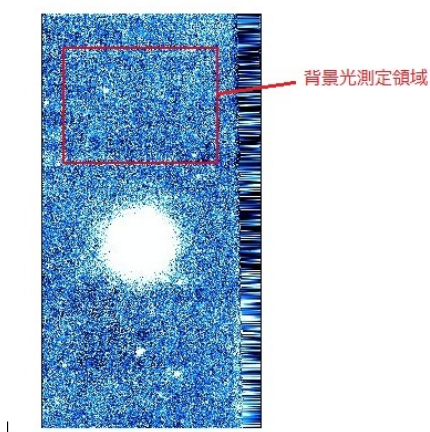


図 3.15: 背景光の測定領域 (垂直成分)

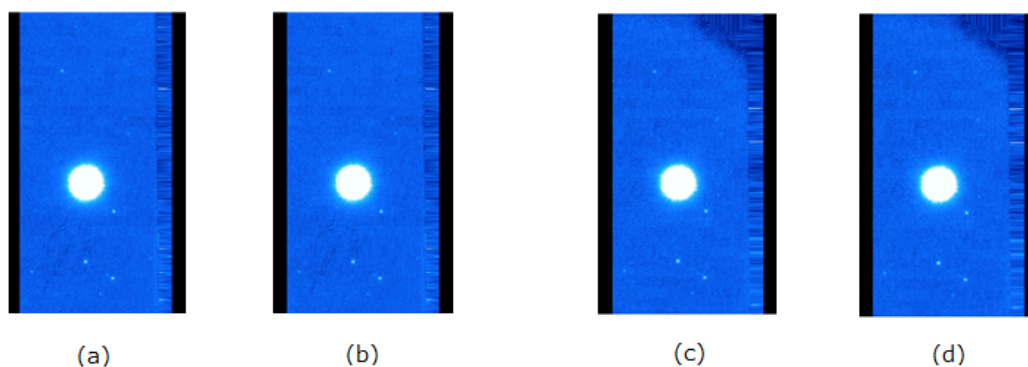


図 3.16: (a) 歪み補正後 (垂直成分) (b) 引き残り除去後 (垂直成分) (c) 歪み補正後 (水平成分) (d) 引き残り除去後 (水平成分)

	背景光除去前	背景光除去後
垂直成分	-0.25	4.97×10^{-7}
水平成分	-0.2	-6.37×10^{-7}

表 3.4: 背景光除去前と除去後のピクセル値の比較

背景光の引き残りが除去され、ほぼ天体の光が写っていない領域の値が0になっているのが確認できた。

3.3.7 ストークスパラメータの導出

ストークスパラメータとは、偏光光の偏光状態を記述するためのパラメータである (詳細は§2.2.1). このストークスパラメータを用いて、偏光強度や偏光角を算出することができる. 背景光の引き残り除去後のフレームを用いて、ストークスパラメータ (I' , Q' , U') の計算を行った. 以下では、右下の添字は半波長板の角度 (例 I_0), 右上の添字の “H” は垂直成分 (例 I^H), “V” は水平成分 (例 I^V), “ I ” は光学系由来の器械偏光を含む (例 I') という意味で使用した.

はじめに I' の計算方法を説明する. 式 (2.12) を用いて I' を計算した.

$$I'_0 = I_0^H + I_0^V, \quad (3.1)$$

$$I'_{45} = I_{45}^H + I_{45}^V, \quad (3.2)$$

$$I'_{22.5} = I_{22.5}^H + I_{22.5}^V, \quad (3.3)$$

$$I'_{67.5} = I_{67.5}^H + I_{67.5}^V. \quad (3.4)$$

半波長板を0度と45度にした際の $I_0^{H,V}$ と $I_{45}^{H,V}$ の成分は、3.17 に示す通りである.

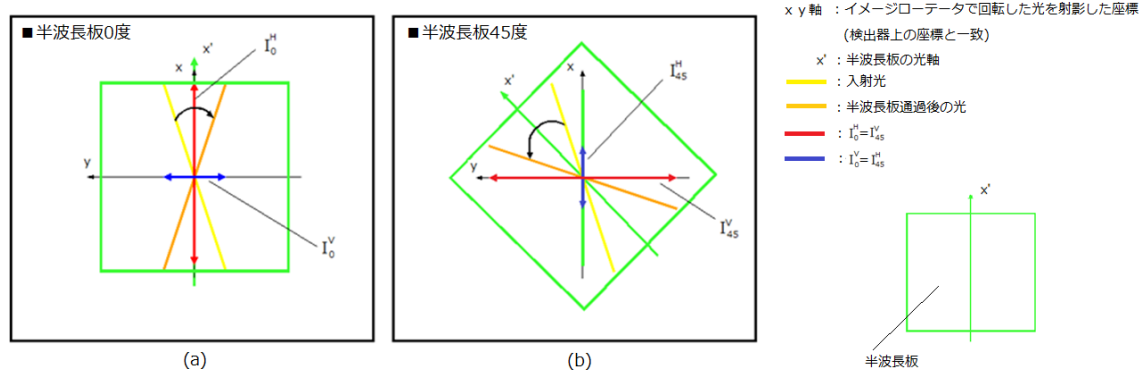


図 3.17: 半波長板通過後に検出される成分 (a) 半波長板 0 度 (b) 半波長板 45 度

この方法で求めた I'_θ には、円盤散乱光だけではなく、マスクから漏れた中心星の光や光学系によって器械的に偏光した光も混在している. 器械偏光の補正方法については、§3.3.8 と §3.3.9 で記述する.

$$\begin{aligned} I'_{0, 45, 22.5, 67.5} &= \text{円盤ダストによって散乱された円盤散乱光} \\ &+ \text{マスクから漏れ出した中心星の光} \\ &+ \text{光学系によって偏光した光.} \end{aligned} \quad (3.5)$$

次に、 I'_θ の導出と同様に、 $I_\theta^{H,V}$ を用いて、式 (2.8)~(2.11) の計算方法で、 Q' 、 $-Q'$ 、 U' 、 $-U'$ をそれぞれ求めた。

$$Q' = I_0^H - I_0^V, \quad (3.6)$$

$$-Q' = I_{45}^H - I_{45}^V, \quad (3.7)$$

$$U' = I_{22.5}^H - I_{22.5}^V, \quad (3.8)$$

$$-U' = I_{67.5}^H - I_{67.5}^V. \quad (3.9)$$

ここで、 I_θ^H と I_θ^V は同時刻に検出されたものなので、中心星の漏れだしの PSF が同じ状態 (形状) で検出されていると考えられる。よって Q' 、 U' は、垂直成分から水平成分を差し引いたときに、マスクから漏れだした無偏光の中心星の光や光学系由来のスペックルは除去されている。しかし器械偏光は残っているので、これを補正する必要がある。補正の方法は三種類試みたが、最も良い結果が得られた補正方法を §3.3.8 以降で記述する。この三種類の方法で、結果にさほど大きな差はないが (概ね 10 % 以下)、他の二種類の方法と、方法の違いによって結果にどの程度の差があるかは付録に記載した。

Q は、直線偏光の天球面上の 0 度方向への傾き度合い、 U は 45 度方向への傾き度合いを示すパラメータである。例えば、検出した強度の最大値を 1 とすると、偏光角 0 度の直線偏光成分は、 Q を計算した場合に 1 の強度を示す。一方、偏光角 90 度の直線偏光成分は、 Q において -1 の強度を示す。円盤散乱光は、中心星の放射が円盤への入射角と直交する方向に直線偏光して観測されるので、face on 構造の円盤において理想的に Q 、 U は、図 3.18 のようになると予想される。図 3.18 の白い部分が 1 の値を示し、黒い部分が -1 を示す。

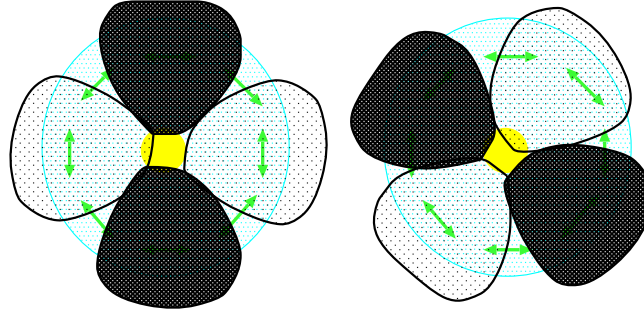


図 3.18: 理論的に期待される Q (左) と U (右) のパターン (face on disk)

図 3.19 は実際のデータから、式 (3.1)~(3.4) と式 (3.6)~(3.9) を用いて算出した Q' 、 $-Q'$ 、 U' 、 $-U'$ 、 I' である。

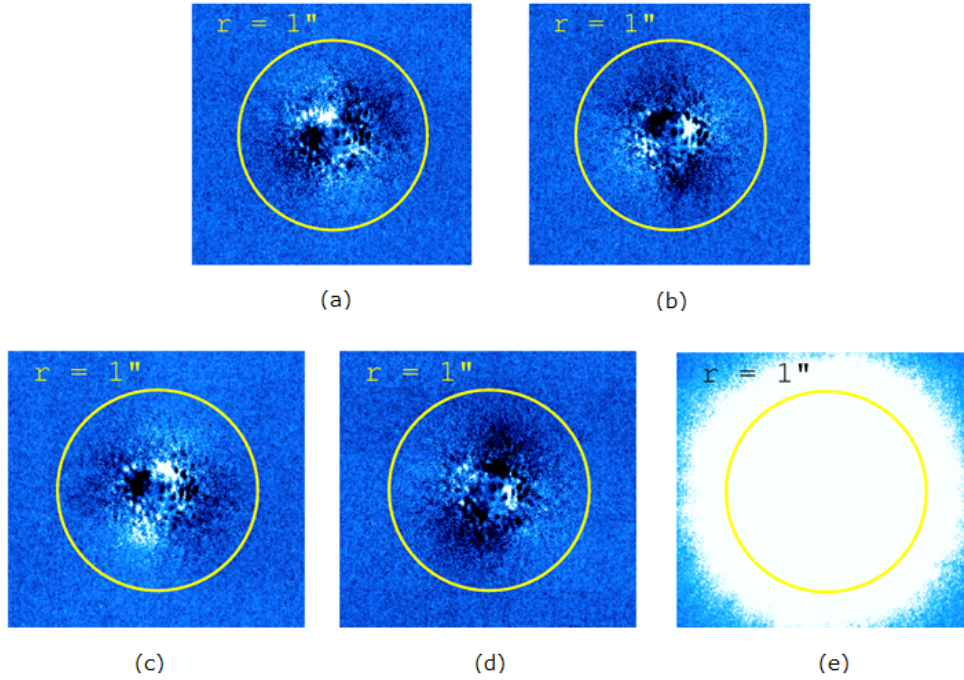


図 3.19: (a) Q' (b) $-Q'$ (c) U' (d) $-U'$ (e) I'_0

これらの Q' と U' を見ると、予想される Q, U である図 3.18 に比べてフレームが回転しているように見える。これは、上記のように PDI + ADI モードで撮られたデータであるため、ADI 視野回転の影響で北の向きとフレームの 0 度 (上) の向きが合っていないからである。PDI + ADI モードで撮られたデータの器械偏光補正と ADI 回転補正を行うことで、この Q' や U' は図 3.18 に近づく。

以下では、器械偏光補正の原理を説明するために PDI モードで撮られたデータの器械偏光補正方法を説明 (§3.3.8) し、その後 PDI + ADI モードで撮られたデータの器械偏光補正と ADI 回転補正の方法を順に説明していく (§3.3.9)。

3.3.8 PDI モードで撮られたデータの器械偏光補正

観測結果から導かれる、 I' 、 Q' 、 U' は、式 (3.10)～式 (3.12) における $x_{[**, \theta]}$ の係数を用いた線形和で表すことができる。これらの係数は、各フレームの観測時に、光学系の状態によって時々刻々と変化して現れる器械偏光の補正係数である。この係数は、各フレームのヘッダー (fits ファイルのはじめにアスキー形式で書かれている部分) に以下の形式で補完されているので、ヘッダーから読み込んで使用する。

器械偏光補正係数

```
P_IPX11 =          0.95185    / IP coefficient of X11
P_IPX12 =          0.003334   / IP coefficient of X12
```

$P_IPX13 = -0.003253$ / IP coefficient of X13
 $P_IPX14 = 0.000271$ / IP coefficient of X14
 $P_IPX21 = -0.003821$ / IP coefficient of X21
 $P_IPX22 = -0.175395$ / IP coefficient of X22
 $P_IPX23 = 0.928898$ / IP coefficient of X23
 $P_IPX24 = -0.111339$ / IP coefficient of X24

$x_{[**, \theta]}$ の θ は、半波長板の角度を表し、** 部分には、以下の 11~14, 21~24 の数値が入る。例えば $x_{[11, 0]}$ は、半波長板 0 度のデータの P_IPX11 の係数という意味である。また、式 (3.11) と式 (3.12) の右辺は同じ表記であるが、式 (3.11) では $\theta = 0$ もしくは 45 であり、式 (3.12) では $\theta = 22.5$ もしくは 67.5 である。

$$I'_\theta = x_{[11, \theta]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[12, \theta]} \times Q + x_{[13, \theta]} \times U + x_{[14, \theta]} \times V, \quad (3.10)$$

$$Q'_\theta = x_{[21, \theta]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[22, \theta]} \times Q + x_{[23, \theta]} \times U + x_{[24, \theta]} \times V, \quad (3.11)$$

$$U'_\theta = x_{[21, \theta]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[22, \theta]} \times Q + x_{[23, \theta]} \times U + x_{[24, \theta]} \times V. \quad (3.12)$$

ここで、 $I_{\text{disk+PSF}}$ は円盤散乱光とマスクから漏れ出た星の光の両方が、混在していることを指し、 Q, U, V はそれぞれ散乱光のもつストークスパラメータである。円偏光成分が無視できる場合、 $V \approx 0$ と近似できるため、式 (3.13)~(3.15) のように書くことができる。

$$I'_\theta = x_{[11, \theta]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[12, \theta]} \times Q + x_{[13, \theta]} \times U, \quad (3.13)$$

$$Q'_\theta = x_{[21, \theta]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[22, \theta]} \times Q + x_{[23, \theta]} \times U, \quad (3.14)$$

$$U'_\theta = x_{[21, \theta]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[22, \theta]} \times Q + x_{[23, \theta]} \times U. \quad (3.15)$$

次に、 I', Q', U' の補正方法を説明する。はじめに I' を補正して $I_{\text{disk+PSF}}$ を求め、それを用いて Q と U を求める。

I' について、式 (3.13) の I の補正係数を見てみると、 $x_{[11, \theta]}$ に比べ、 $x_{[12 \text{ or } 13, \theta]}$ の値は二桁小さい係数となっていた。これは、 I' の Q, U 成分が小さいためであり、この値はデータによって大きく変動しないが、確認のため全てのデータを確認した。よって半波長板 0 度の場合を例にとると、式 (3.16) のように近似できる。

$$I'_0 = x_{[11, 0]} \times I_{[\text{disk+PSF}, 0]}. \quad (3.16)$$

ここで、式 (3.16) の $I_{[\text{disk+PSF}, 0]}$ は、半波長板の角度 0 度の時の $I_{\text{disk+PSF}}$ を指す。更に、 $I_{[\text{disk+PSF}, 45]}$, $I_{[\text{disk+PSF}, 22.5]}$, $I_{[\text{disk+PSF}, 67.5]}$ も同様に計算することができる。

$$I'_{45} = x_{[11, 45]} \times I_{[\text{disk+PSF}, 45]}, \quad (3.17)$$

$$I'_{22.5} = x_{[11, 22.5]} \times I_{[\text{disk+PSF}, 22.5]}, \quad (3.18)$$

$$I'_{67.5} = x_{[11, 67.5]} \times I_{[\text{disk+PSF}, 67.5]}. \quad (3.19)$$

ここで、半波長板の透過率の角度依存性は、 $0^\circ, 45^\circ, 22.5^\circ, 67.5^\circ$ でほぼ一定である (誤差はフラックスの 1 % 程度)。よって、 $I_{[\text{disk+PSF}, 0]} \approx I_{[\text{disk+PSF}, 45]} \approx I_{[\text{disk+PSF}, 22.5]} \approx I_{[\text{disk+PSF}, 67.5]} \approx I_{\text{disk+PSF}}$ と近似した。これを用いると式 (3.16)~(3.19) は、

$$\begin{aligned}
& x_{[11,0]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[11,45]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[11,22.5]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[11,67.5]} \times I_{\text{disk+PSF}} \\
& = I'_0 + I'_{45} + I'_{22.5} + I'_{67.5},
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$I_{\text{disk+PSF}} = \frac{I'_0 + I'_{45} + I'_{22.5} + I'_{67.5}}{x_{[11,0]} + x_{[11,45]} + x_{[11,22.5]} + x_{[11,67.5]}}. \tag{3.21}$$

補足すると、式 (3.21) の計算方法は、式 (3.22) でもよく、両者で計算した違いは 0.1 % 程度であった。よってどちらの計算方法を用いても、解析に大きな差はない。

$$I_{\text{disk+PSF}} = \frac{1}{4} \left(\frac{I'_0}{x_{[11,0]}} + \frac{I'_{45}}{x_{[11,45]}} + \frac{I'_{22.5}}{x_{[11,22.5]}} + \frac{I'_{67.5}}{x_{[11,67.5]}} \right). \tag{3.22}$$

次に Q'_0 , $-Q'_{45}$, $U'_{22.5}$, $-U'_{67.5}$ の一般的な補正方法を説明する。ここで $I_{\text{disk+PSF}}$ には式 (3.21) で得られる値を代入する。

$$Q'_0 = x_{[21,0]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[22,0]} \times Q + x_{[23,0]} \times U, \tag{3.23}$$

$$-Q'_{45} = x_{[21,45]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[22,45]} \times Q + x_{[23,45]} \times U, \tag{3.24}$$

$$U'_{22.5} = x_{[21,22.5]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[22,22.5]} \times Q + x_{[23,22.5]} \times U, \tag{3.25}$$

$$-U'_{67.5} = x_{[21,67.5]} \times I_{\text{disk+PSF}} + x_{[22,67.5]} \times Q + x_{[23,67.5]} \times U. \tag{3.26}$$

さらに、 Q と $-Q$ の信号雑音比を上げるためにそれぞれ引き算する。

$$\begin{aligned}
Q'_0 - (-Q'_{45}) &= (x_{[21,0]} - x_{[21,45]}) \times I_{\text{disk+PSF}} + (x_{[22,0]} - x_{[22,45]}) \times Q \\
&+ (x_{[23,0]} - x_{[23,45]}) \times U,
\end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}
2Q' &= (x_{[21,0]} - x_{[21,45]}) \times I_{\text{disk+PSF}} + (x_{[22,0]} - x_{[22,45]}) \times Q \\
&+ (x_{[23,0]} - x_{[23,45]}) \times U.
\end{aligned} \tag{3.28}$$

U と $-U$ も同様に行う。

$$\begin{aligned}
U'_{22.5} - (-U'_{67.5}) &= (x_{[21,22.5]} - x_{[21,67.5]}) \times I_{\text{disk+PSF}} + (x_{[22,22.5]} - x_{[22,67.5]}) \times Q \\
&+ (x_{[23,22.5]} - x_{[23,67.5]}) \times U,
\end{aligned} \tag{3.29}$$

$$\begin{aligned}
2U' &= (x_{[21,22.5]} - x_{[21,67.5]}) \times I_{\text{disk+PSF}} + (x_{[22,22.5]} - x_{[22,67.5]}) \times Q \\
&+ (x_{[23,22.5]} - x_{[23,67.5]}) \times U.
\end{aligned} \tag{3.30}$$

式 (3.28) と (3.30) の恒等式の行列式を解くことで、 Q と U を求める事ができる。しかし、今回の観測は、PDI モード単独ではなく PDI+ADI モードで取得されている。ADI モードではフレーム間で視野が回転しており、 Q'_0 , $-Q'_{45}$, $U'_{22.5}$, $-U'_{67.5}$ の各フレームで回転角が異なる (4 枚で 0.6" 角程度)。つまり、回転角の異なる北の位置が揃わないフレームを用いて $I Q U$ を導出している。 $I Q U$ をこの方法で求めると、回転角の異なるフレームを足し合わせるので、天体の正しい像を復元できないという問題が生じる。しかし一方で、ADI 回転角を補正してから器械偏光の補正を行うとすると、データ取得時の光学系の状態から算出している器械偏光補正係数 ($x_{[**, \theta]}$) を使って補正するのに矛盾が生じる。以上の理由から、器械偏光補正と ADI 回転補正をどちらも完璧に行うのは無理である。ただ、最大限どちらも正しく補正を行うのが望ましいので、3つの補正方法で偏光補正を行い、一番もっともらしい方法を採用した。その方法について以下に述べる (他の 2 つの方法は付録参照)。

3.3.9 PDI+ADI モードで撮られたデータの器械偏光の補正

ここでは、PDI+ADI モードで撮られたデータの器械偏光と ADI 回転角の補正方法を説明する。ADI 回転角とは、天球面上での北の向きと観測データ 0 度 (x 軸) とのずれ量を指し、図 3.20 で示す α に対応する量である。 $I'_0, I'_{45}, I'_{22.5}, I'_{67.5}, Q'_0, -Q'_{45}, U'_{22.5}, -U'_{67.5}$ は、歪み補正後、垂直成分+水平成分 ($I'_0, I'_{45}, I'_{22.5}, I'_{67.5}$)、垂直成分 - 水平成分 ($Q'_0, -Q'_{45}, U'_{22.5}, -U'_{67.5}$) を計算したものを指す。

補正の手順としては、まず ADI 回転角の大きさを計算し、更にフレームの ADI 回転中心の座標を求め、最後に器械偏光と ADI 回転角の補正を行う。



図 3.20: ADI 回転角 (α)

はじめに、各フレーム毎に ADI 回転角を求めた。各フレームがどれだけ回転しているかを計算するには、HiCIAO 装置チームから配布されたプログラムを使用した (プログラム名は calc_adipa.c)。プログラムの使用方法は以下の通りである。

1. HD 169142 のデータのヘッダーから、以下のように補完された観測日、UT 時間、赤経、赤緯、オフセットの値をフレーム毎に読む。下記は、扱ったデータの数値例である。

```
DATE-OBS= '2011-05-24'           / Observation start date (UT'yyyy-mm-dd')
UT       = '12:15:05.047'         / HH:MM:SS.S start UTC at exposure
RA2000   = '18:24:30.215'         / HH:MM:SS.SSS RA (J2000) pointing)
DEC2000   = '-29:46:55.22'        / +/-DD:MM:SS.SS DEC (J2000) pointing)
P_IMROFF=      -129.45           / Offset angle of AOImR (degree)
```

2. calc_adipa.c を実行する。

コンパイル方法は、

```
gcc -o calc_adipa calc_adipa.c lib_track.c -lm
```

実行方法は、

```
./calc_adipa [date] [ut] [ra] [dec] [offret_angle]
```

date: 観測日 (UT)

ut : 積分中の典型的な UT 時間

ra : 赤経 (J2000)

dec : 赤緯 (J2000)

offset_angle : スパイダーのオフセット角 [deg]

である。1 の例では、次のようになる。

```
./calc_adipa 2011/05/24 12:15:05.047 18:24:30.215 -29:46:55.22 129.45
```

3. 実行するとターミナル上に次のような形式で表示される。“ADIpa” の値が ADI 回転角に相当する。

ADIpa = -58.258 , IMRang = 0.290

この値だけ反時計周りに回転させると、フレームの上が北に相当するように補正される。もしサイエンスフレームに背景星が写っている場合には、上記の方法で求めた回転角が正しいかを大まかに確認できる。

本観測で用いたデータには背景星が写っていたので確認を行った。ADI 回転角の異なる I を 2 枚を使用し、上記で求めた回転角だけ両フレームを回転させたのち、両者を差し引いた。回転角が正しいければ無偏光成分である背景星の光は消えるはずであり、この方法を用いてフレーム間での矛盾がないことを確認した。

回転角を求めたのち、ADI 視野回転の回転中心を算出する。装置チームによると、回転中心は星の位置にほぼ等しいとのことであった (エラーは 1 ピクセル以下)。しかし、星はコロナグラフマスクに隠れているため、正確な位置を直接求めることはできなかった。そのため本研究では、より正確な回転中心を求めるため以下の方法で回転中心を求めた。その方法を以下に示す。以下の star1~star4 は計算に用いた背景星を示している (図 3.21)。各フレームの背景星の座標は、その星の最大のピクセル値を取る座標とした。

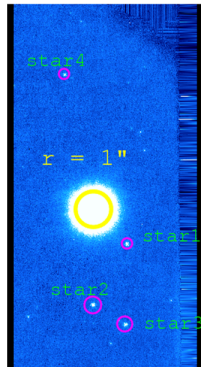


図 3.21: 背景星の位置

回転中心を求める際には、観測時間の異なるフレーム 2 枚 (α が異なるフレーム 1 とフレーム 2) を使用した。

1. 異なるフレーム間の回転角のずれ量を β とし、 β を計算する (図 3.22)。

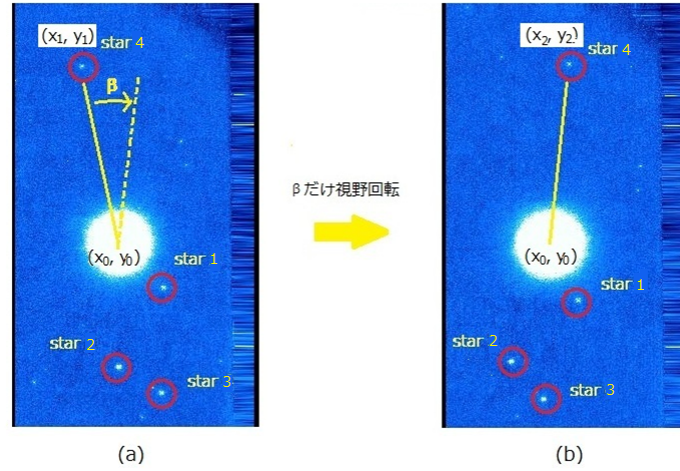


図 3.22: フレーム間の回転角 β

2. 各フレームの背景星の座標を測る.
3. 任意の 1 枚のフレームの star1(フレーム 1: (x_1, y_1)) の座標が, 回転中心を (x_0, y_0) として, 回転角 β だけ時計回りに回転し, 異なるもう一枚のフレームの star1(フレーム 2: (x_2, y_2)) の座標に移動したとした. その様子は式 (3.31) のように書くことができる.

$$\begin{pmatrix} x_2 - x_0 \\ y_2 - y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 - x_0 \\ y_1 - y_0 \end{pmatrix}. \quad (3.31)$$

4. 式 (3.31) を解いて (x_0, y_0) を求める.

フレーム 1 とフレーム 2 を, (1) 連続する 2 枚, (2) 5 枚おき (1 枚目と 5 枚目などの 2 枚), (3) 10 枚おき, (4) 15 枚おき, (5) 20 枚おき, (6) 25 枚おき, (7) 30 枚おき, (8) 35 枚おきとして, それぞれの背景星を用いて中心星の座標を計算し, その結果をを表 3.5 に示した.

	star 1	star 2	star 3	star 4
	(x_0, y_0)	(x_0, y_0)	(x_0, y_0)	(x_0, y_0)
(1)	449.2 $\pm$ 7.5, 897.9 $\pm$ 9.6	450.8 $\pm$ 8, 897.8 $\pm$ 9.8	449.8 $\pm$ 9.4, 898.1 $\pm$ 11	448.5 $\pm$ 9.2, 896.1 $\pm$ 12
(2)	448.0 $\pm$ 2.2, 897.4 $\pm$ 3.3	448.9 $\pm$ 2.1, 897.5 $\pm$ 2.9	448.1 $\pm$ 2.5, 898.7 $\pm$ 3.0	448.4 $\pm$ 2.4, 896.1 $\pm$ 3.1
(3)	447.4 $\pm$ 0.9, 897.0 $\pm$ 1.4	448.7 $\pm$ 0.8, 897.3 $\pm$ 1.3	447.9 $\pm$ 1.0, 898.6 $\pm$ 1.4	448.1 $\pm$ 1.1, 896.2 $\pm$ 1.5
(4)	447.5 $\pm$ 0.6, 897.1 $\pm$ 0.8	448.8 $\pm$ 0.6, 897.4 $\pm$ 0.9	447.9 $\pm$ 0.7, 897.8 $\pm$ 0.9	448.0 $\pm$ 0.7, 896.5 $\pm$ 1.0
(5)	447.4 $\pm$ 0.5, 897.2 $\pm$ 0.6	448.7 $\pm$ 0.5, 897.4 $\pm$ 0.6	447.7 $\pm$ 0.6, 897.8 $\pm$ 0.7	448.3 $\pm$ 0.5, 896.8 $\pm$ 0.7
(6)	447.2 $\pm$ 0.4, 897.5 $\pm$ 0.6	448.6 $\pm$ 0.4, 897.7 $\pm$ 0.6	447.7 $\pm$ 0.47, 898.1 $\pm$ 0.6	448.0 $\pm$ 0.5, 897.5 $\pm$ 0.7
(7)	447.2 $\pm$ 0.3, 897.2 $\pm$ 0.4	448.6 $\pm$ 0.3, 897.3 $\pm$ 0.4	447.7 $\pm$ 0.4, 897.7 $\pm$ 0.5	448.1 $\pm$ 0.4, 897.4 $\pm$ 0.5
(8)	447.1 $\pm$ 0.3, 897.1 $\pm$ 0.3	448.6 $\pm$ 0.3, 897.1 $\pm$ 0.4	448.6 $\pm$ 0.4, 897.6 $\pm$ 0.4	448.1 $\pm$ 0.3, 897.4 $\pm$ 0.4

表 3.5: 回転中心計算の結果

この結果から、回転中心の最適値を決定するために、star1,2 を使って計算した回転中心のうち、10 枚おき以上の 2 フレームを使って導出したものを使用した。まず、連続する 2 枚のフレームと 5 枚おきのフレームを用いて導出した回転中心を排除した理由は、この両者では計算に使用する背景星の位置が、非常に近いためである。これにより、背景星の座標の不定性が大きく影響し、精度よく回転中心を決定することができないからである。さらに star3,4 を排除した理由は、中心星から比較的遠くに位置し、歪み補正の不定性が大きいからである。

この結果を用いて、誤差が小さい座標に重みをつけ、平均した結果を回転中心最適値とした (表 3.6)。

	(x_0, y_0)
回転中心最適値	$(447.9 \pm 0.2, 897.2 \pm 0.05)$

表 3.6: 回転中心最適値

図 3.23 に、 I におけるマスク中心と回転中心の位置を示した。これより、回転中心は、マスク中心よりも 4 ピクセル程ずれていることが明らかとなった。

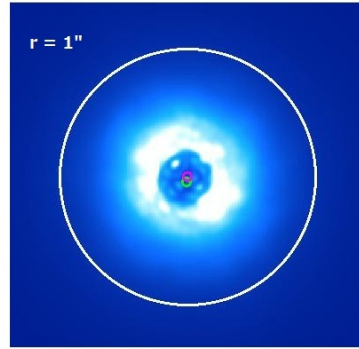


図 3.23: 緑：マスク中心 (447,893) ピンク：回転中心 (447.9,897.2)

ここまでで求めた ADI 回転角と ADI 回転中心を用いて、PDI +ADI モードにおける器械偏光補正と ADI 回転補正を以下の手順で行った。

§3.3.8 で記述したように、PDI モードでの器械偏光補正では、半波長板の角度 (0 度、45 度、22.5 度、67.5 度) のデータ 4 枚を用いて補正を行う。この方法では、ADI 回転角の異なるフレームを 4 枚使用して補正を行うので、北の向きを正しく合わせられないという問題がある。一方で ADI 回転角を補正してからでは器械偏光を正しく補正できない。

これをできる限りどちらの補正も正しく行うため、まずはじめに、半波長板の角度が 0 度と 22.5 度の組 (グループ 1) と、45 度と 67.5 度の組 (グループ 2) を作る。次に同じ組の 2 枚のフレーム間で ADI 回転角のずれをなくすように、それぞれの組で 1 枚のフレームのみを回転させる。その後、器械偏光補正を行い、更に北の位置が合うように回転させる。その具体的な手順を以下に示す。

1. $I'_{22.5}$, $U'_{22.5}$ ADI 回転角と, I'_0 , Q'_0 の ADI 回転角のずれ量 β_0 を計算する。同様に, $I'_{67.5}$, $-U'_{67.5}$ の ADI 回転角と, I'_{45} , $-Q'_{45}$ の ADI 回転角のずれ量 β_{45} を計算する。
2. $I'_{22.5}$, $U'_{22.5}$ を β_0 , $I'_{67.5}$, $-U'_{67.5}$ を β_{45} だけ回転させる。

3. グループ 1 の $I_{\text{disk+PSF1}}$ と, グループ 2 の $I_{\text{disk+PSF2}}$ を計算する.

$$I_{\text{disk+PSF1}} = \frac{(I'_0 + I'_{22.5})}{(x_{[11,0]} + x_{[11,22.5]})}, \quad (3.32)$$

$$I_{\text{disk+PSF2}} = \frac{(I'_{45} + I'_{67.5})}{(x_{[11,45]} + x_{[11,67.5]})}. \quad (3.33)$$

4. 次の恒等式を解いて, Q U の器械偏光の補正をする.

$$Q'_0 = x_{[21,0]} \times I_{\text{disk+PSF1}} + x_{[22,0]} \times Q + x_{[23,0]} \times U, \quad (3.34)$$

$$U'_{22.5} = x_{[21,22.5]} \times I_{\text{disk+PSF1}} + x_{[22,22.5]} \times Q + x_{[23,22.5]} \times U. \quad (3.35)$$

同様に, $-Q - U$ についても行う.

$$-Q'_{45} = x_{[21,45]} \times I_{\text{disk+PSF2}} + x_{[22,45]} \times Q + x_{[23,45]} \times U, \quad (3.36)$$

$$-U'_{67.5} = x_{[21,67.5]} \times I_{\text{disk+PSF2}} + x_{[22,67.5]} \times Q + x_{[23,67.5]} \times U. \quad (3.37)$$

5. それぞれのフレームの北の位置が合うように回転させる.

6. 式 (3.34) と式 (3.35) から導出した, グループ 1 の Q , U と式 (3.36) と式 (3.37) から導出したグループ 2 の Q , U のうち, Q , U 同士を平均化する. これは, 式 (3.28) や式 (3.30) で引き算した時と同様に, スペックルノイズを除去する効果がある.

7. $I_{\text{disk+PSF1}}$ と $I_{\text{disk+PSF2}}$ の平均化する.

器械偏光補正と, ADI 回転角の補正を行う前後の比較を, 図 3.24 に示した.

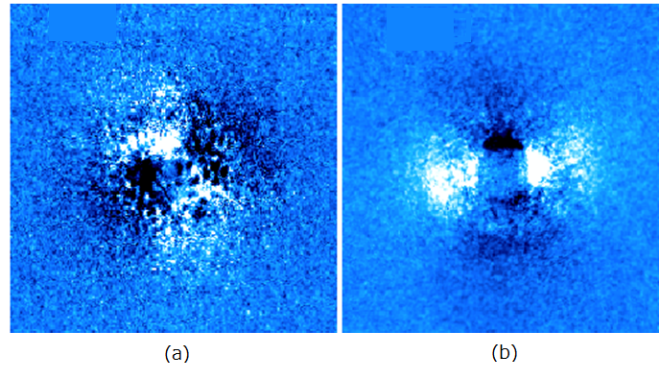


図 3.24: (a) 補正前 Q (b) 器械偏光と ADI 回転角補正後 Q

器械偏光補正と ADI 回転角の補正後の Q , U を平均化したものを図 3.25 に示した. 図 3.18 に示した, face on 構造の円盤から期待されるストークスパラメータのパターンが再現された.

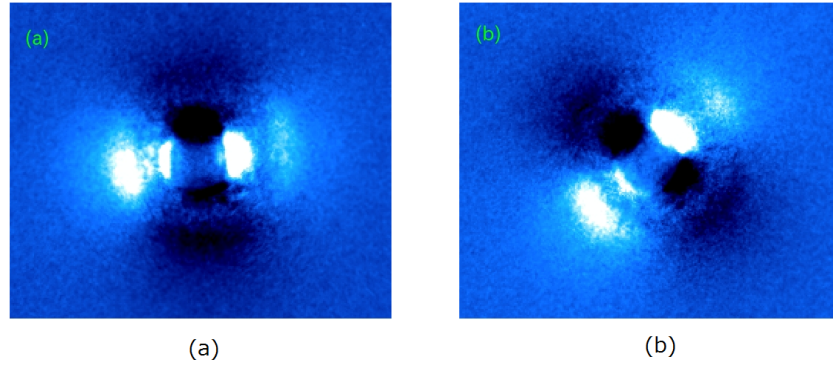


図 3.25: 器械偏光補正と ADI 回転角補正後の Q と U を平均化したもの (a) Q (b) U

3.3.10 偏光強度 (PI) の算出

偏光強度とは偏光成分の強度を指す。本観測で検出された光の偏光光が、全て円盤散乱光だと仮定すると、 PI 画像の幾何学的な広がり、散乱表面の形状を表し、強度の差は、そこでの光源の明るさ、ダストの密度、およびダストの散乱効率に依存する。器械偏光補正と ADI 回転角補正後の Q, U を用いて、式 (2.13) より偏光強度 (PI) を算出した。

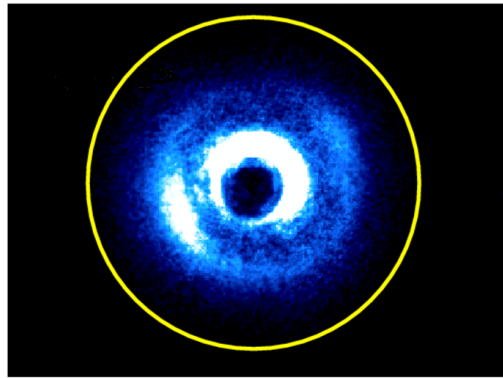


図 3.26: 偏光強度 (PI)

図 3.26 は、 Q, U のフレームを用いて PI を計算し、その PI 画像全てを平均化したものである。しかし、 PI 画像の中には、観測条件の悪いフレームから作成された PI も存在する。以下では、観測状態の悪い PI を特定し、それらを間引くことで、より精度の良い PI 画像を作成する。

3.3.11 悪条件下のフレーム除去

HiCIAO による観測では補償光学 AO188 を用いて、観測時にリアルタイムで、大気の揺らぎを高精度に補正している (§2.4.1). しかしそうであっても、観測中に時々刻々と大気の状態が変動するため、観測フレームの中には大気の揺らぎをよく補正できていないものが存在する. 大気揺らぎの補正が不十分であると、光の点源応答関数 (PSF) が広がる. 反対に、大気揺らぎがよく補正されているフレームは、 I のフレームにおいて PSF が小さくなり、マスクの外側での光の漏れだしが少なくなると期待される. 以下では、 I を用いて、各フレームの大気揺らぎ補正の善し悪しを判定する方法を述べる.

1. I のフレームにおいて、マスク中心から半径 30 ピクセル以内の強度を測定する (図 3.27).
2. マスク中心から半径 45 ピクセル以内の強度を測定し、そこから半径 30 ピクセル以内の強度を引く.
3. I のフレームで、2 の結果の総強度が小さい順に順位をつける.

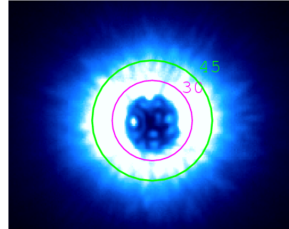
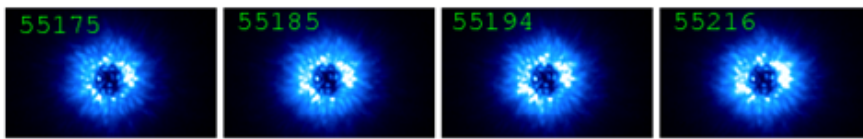


図 3.27: 計算した中心星の位置から、半径 30 ピクセル (ピンク) と 45 ピクセル (緑) の円

I の各フレームにおいて、上記の 2 の結果の総強度が最も小さいフレーム 4 枚と、最も大きいフレーム 4 枚を図 3.28 に示した (表示レンジは統一した). この中でも、最も良いフレームである 55175 と、最も悪いフレームである 55251 の強度の比は、1.6 倍であった.

(a) PSF が小さいフレーム



(b) PSF が大きいフレーム

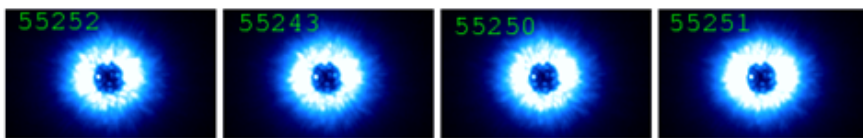


図 3.28: (a)PSF が小さいフレーム (b)PSF が大きいフレーム

次に、PSF の大きいフレームを間引いていき、残りのフレームを積分し、平均したときの“ぼらつき”を確認するために以下の解析を行った。まず、40 枚ある I の画像 (歪み補正、背景光の引き残りを除去し、両偏光成分を足したもの) を全て平均化し、各ピクセルに対するフレーム間での標準偏差を計算した。更に、PSF の大きいと判断したフレームを 5 枚、10 枚、15 枚、20 枚と間引いていき、その都度 I の平均化と標準偏差の計算を行った。各間引き枚数で測った標準偏差を比較した結果は、15 枚のフレームを間引くまでは、フレームを除去する枚数を増やすに従い、標準偏差は小さくなった。しかし、20 枚除去すると標準偏差が大きくなった。これは、フレーム数が少なくなり、積分時間が減った効果が、悪条件のフレームを除く効果を上回ったためと考えられる。

次に、マスクからの漏れだしが多いフレームを使って計算した PI についても、1 枚 ~ 4 枚まで 1 枚ずつ間引き、それぞれ平均した PI を作成した。その結果、ほぼ PI に違いは見られず、標準偏差にも大きな改善は見られなかった。(PI を 1 枚作るために必要なフレームは、 $Q, -Q, U, -U$ の 4 枚なので、 PI 1 枚除去に対応する実際のフレーム除去枚数は 4 枚である)。この結果を図 3.29 に示した。

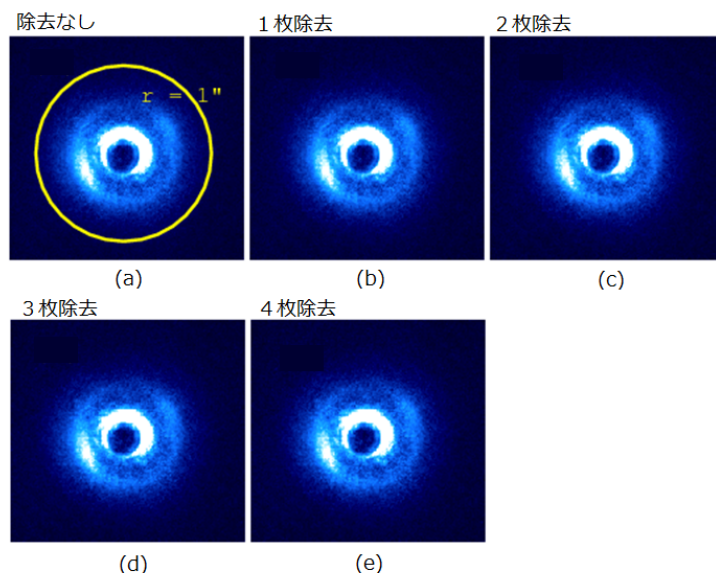


図 3.29: (a) 除去なし PI (b) 1 枚除去 PI (c) 2 枚除去 PI (d) 3 枚除去 PI (e) 4 枚除去 PI

この結果から、PSF の大きいフレームを多く除去しても、標準偏差に大きな改善が見られなかった。このため間引く枚数は少なくし、S/N を上げることを優先することとした。上記したように、PSF の最も悪いフレームのマスクからの漏れ出し量は、良いフレームのそれに比べて 1.6 倍であるので、このフレームは除去するのが良いと判断した。

最終的な偏光強度 (PI) の画像を図 3.30 に示した。

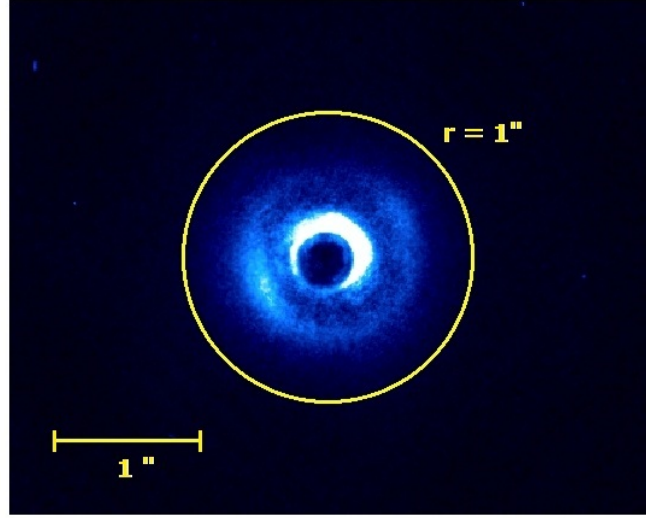


図 3.30: S/N 最適にした偏光強度画像

3.3.12 偏光強度 (PI) の誤差判定

次に, PI における誤差を, 式 (3.39) で表される誤差の伝搬の式を使って求めた.

$$\begin{aligned}
 PI &= \sqrt{Q^2 + U^2} = f & (3.38) \\
 (\Delta PI)^2 &= \left(\frac{\partial f}{\partial Q} \right)^2 (\Delta Q)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial U} \right)^2 (\Delta U)^2 \\
 &= \left\{ \frac{1}{2}(Q^2 + U^2)^{-\frac{1}{2}} \times 2Q \right\}^2 (\Delta Q)^2 + \left\{ \frac{1}{2}(Q^2 + U^2)^{-\frac{1}{2}} \times 2U \right\}^2 (\Delta U)^2 \\
 &= \left\{ (Q^2 + U^2)^{-\frac{1}{2}} \times Q \right\}^2 (\Delta Q)^2 + \left\{ (Q^2 + U^2)^{-\frac{1}{2}} \times U \right\}^2 (\Delta U)^2 & (3.39)
 \end{aligned}$$

PI を作った時に使用した Q, U を用いて, まず Q, U の 19 枚のフレーム間における標準偏差を求めた.

Q, U を平均化するとき, IRAF のタスク `imcombin` のパラメータ “sigma” を設定することで, Q, U の各フレームのピクセル毎に標準偏差を計算した `fits` ファイルを作成した. このフレームを Q, U を平均化したフレームの枚数の平方根で割ると, 式 (3.39) の Q, U の平均値に対するばらつき ($\Delta Q, \Delta U$) を求めることができる.

$$\begin{aligned}
 \Delta Q &= \frac{Q_sigma.fits}{\sqrt{19}}, \\
 \Delta U &= \frac{U_sigma.fits}{\sqrt{19}}.
 \end{aligned}$$

図 3.31(a)(b)(c)(d) に, 誤差の計算で使用した $Q, U, \Delta Q, \Delta U$ を示した.

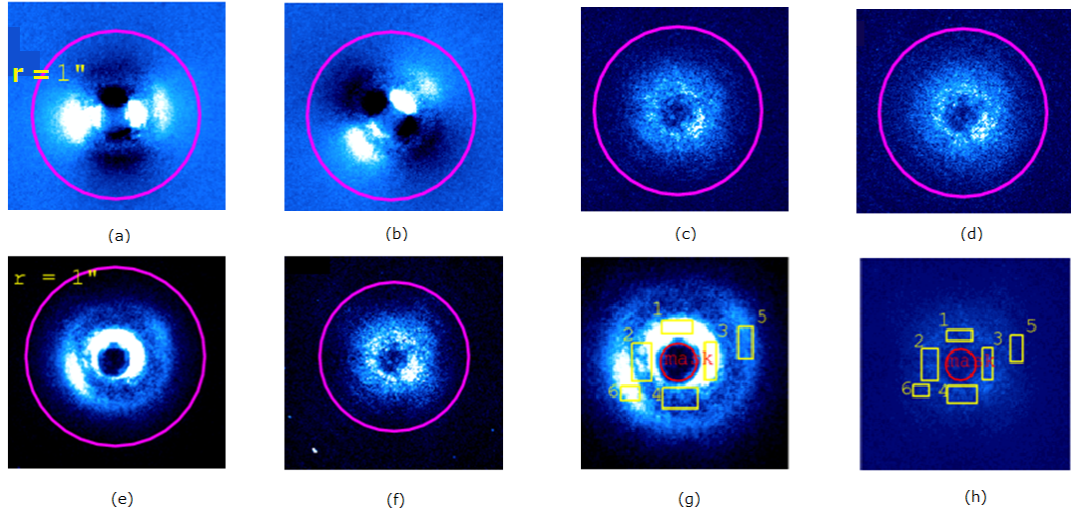


図 3.31: (a) Q (b) U (c) ΔQ (d) ΔU (e) PI (f) ΔPI (g)(h) 領域 1-6

ここで求めた PI の誤差が, PI の何割程度かを調べるために, 図 3.31(g)(h) で示した領域で PI と PI 誤差のピクセル値を測って比較を行い, その結果を表 3.7 に示した.

方法	領域 1	領域 2	領域 3	領域 4	領域 5	領域 6
PI	1	1	1	1	1	1
PI 誤差	0.04	0.10	0.05	0.15	0.09	0.09

表 3.7: PI を基準にした PI と PI のエラーの比較

これより, PI には $\sim 10\%$ の誤差が見込まれることがわかった. また, 器械偏光補正を行う際に使用する補正係数にも不定性がある. 参考までに, 器械偏光補正の不定性をふまえて誤差の判定をした結果を付録に記載した.

3.3.13 PSF 標準星との比較

ここでは, PSF 標準星に対するデータと比較することにより, HD 169142 のデータから得られた偏光強度が, 円盤に含まれるダストによる散乱光を有意に検出したものかについて議論する.

PSF 標準星とは, マスクから漏れ出した中心星の光の広がり方を見積もるために観測した天体である. コロナグラフ観測では, 遮光円盤で中心星の光をマスクで遮断した状態で観測を行う. しかし, 中心星付近の観測を狙うための小さなマスク (直径 $0.3''$) では, 完全に中心星の放射を遮ることはできない. ストークスパラメータの Q や U を計算する際には, 中心星の光の漏れだしは引き算されて概ね除去されるが, I を計算するときには除去されない.

$$I = I_{disk} + I_{PSF}. \quad (3.40)$$

式 (3.40) の右辺の第二項である I_{PSF} を見積もるために、円盤を持たないと考えられている星である HD 166903 を PDI + ADI モードで観測した。

さらに、この天体は円盤を伴っていないため、円盤ダスト散乱による偏光もないと考えられる。にもかかわらず、この天体のデータを解析して偏光強度が得られたとすると、その値は装置や大気由来の偏光で、補正できない光の見積りであると考えられる。ゆえに、HD 169142 の偏光強度が、PSF 標準星から得られる偏光強度に比べて PI の測定誤差だけでは説明できないほど有意に大きければ、円盤散乱光が十分な S/N で得られたことになる。

これを調べるため、HD 166903 の観測データを解析し偏光強度を算出した (図 3.32a)。解析方法は HD 169142 の解析と全く同じ方法で行った。(解析過程の画像は付録 A に記載した)。図 3.32(a) は、PSF 標準星から得られた偏光強度の画像である。図 3.32(b)(c) に示す HD 169142 の偏光強度と、PSF 標準星の偏光強度の 1 から 10 の各領域で、それぞれピクセル値を測り、比較を行った。PSF 標準性のピクセル値を 1 としたときの結果を、表 3.8 に記載した。

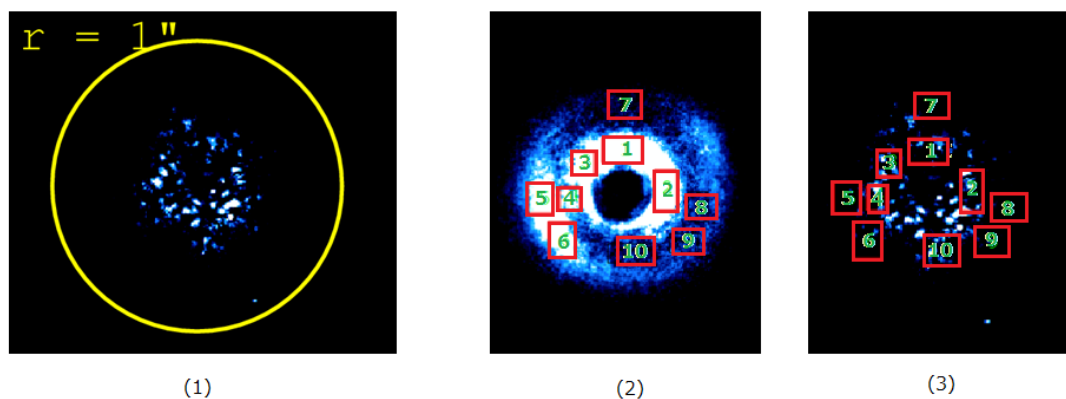


図 3.32: (a)PSF 標準星 HD166903 の観測データから算出した PI (b)HD169142 の PI の画像における領域 1~10 の位置 (b) PSF 標準星 HD166903 PI の画像における領域 1~10 の位置

	領域 1	領域 2	領域 3	領域 4	領域 5	領域 6	領域 7	領域 8	領域 9	領域 10
HD 169142	5.90	5.23	2.97	2.47	4.44	4.02	2.30	3.10	2.28	1.58
PSF 標準星	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 3.8: HD 169142 の PI と PSF 標準星の PI の比較

この結果を見ると、HD 169142 の偏光強度測定誤差が最大約 10 パーセントであることを考慮にいれても、PSF 標準星で得られた PI の値に比べ有意に大きい。この比較から、HD 169142 の円盤散乱光が有意に検出されていたということが結論づけられる。

3.3.14 S/N マップ

信号が有意に検出されているかを確認するもう一つの手法は、 S/N マップである。 S/N とは、single to noise の略称で、雑音 (ノイズ) に対して信号がどの程度の精度で受かっているかを表す量である (式 (3.41)). 最低限検出が見込まれる S/N の目安は、 $S/N > 3$ である。

$$S/N = \frac{I_n \cdot t}{\sqrt{(I'_n + I_{obs})t + \sigma^2}}. \quad (3.41)$$

ここで、 I_n は単位時間あたりの天体からの光子数、 I'_n は単位時間あたりの天体からの光の揺らぎ ($=I_n$)、 I_{obs} は単位時間あたりの背景光 (空) の光子数、 σ は検出器の読み出しノイズ (読み出し回数に依存)、 t は積分時間である。 PI 画像で検出されている構造が有意かどうかを調べるため、 S/N を計算し、 S/N マップを描いた。 σ は 3.3.1 で除去したので、 $\sigma \approx 0$ と近似する。また、式 (3.41) の分母にある $(I'_n + I_{obs})$ は、ここでは解析によってノイズを除去したのち、除去しきれなかったエラーと考えた。よって、式 (3.41) は、

$$S/N = \frac{PI}{\sqrt{PI_{error}}} \cdot \sqrt{t}. \quad (3.42)$$

ここで、 PI_{error} は式 (3.39) とした。計算結果を、図 3.33 に記載した。

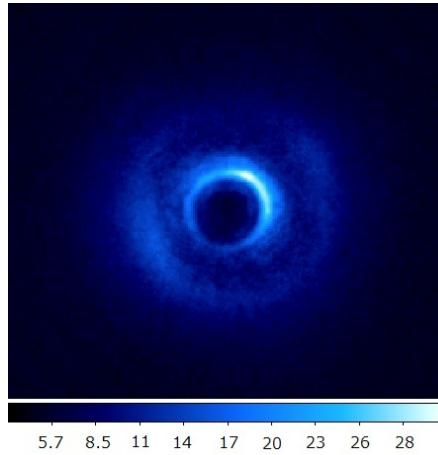


図 3.33: S/N マップ

この結果から、ノイズに埋もれず十分信号は検出されていた。PSF 標準星の PI の比較と S/N マップから、見えている円盤の構造は有意に検出されていると結論づけた。

3.3.15 星の位置の導出

ここまでで PI の最終的な画像と誤差を求め、その構造が有意に円盤散乱光を検出しているものであると結論づけることができた。これから PI 画像の定量的な量を見積り、より詳細に円盤の空間構造を調べる。

ここで問題になるのが、コロナグラフマスクに隠された星の位置である。星の位置が特定できなければ、 PI の動径分布や方位角分布を描く際に、中心とするべき点が明確にならないためである。ここでは以下の方法で星の位置の見積りを行う。

HD 169142 の器械偏光補正と ADI 回転補正を行う以前の I' を用いて、星の位置の見積りを行った。

円盤構造の外側における、星を中心とした I' の PSF の広がり、それぞれの半径の方位角方向で一様であると考えられる。このため、星の位置を中心としたときに、それぞれの半径で全方位角方向における I' のピクセル値のばらつきは、最も小さくなると考えられる (図 3.34)。

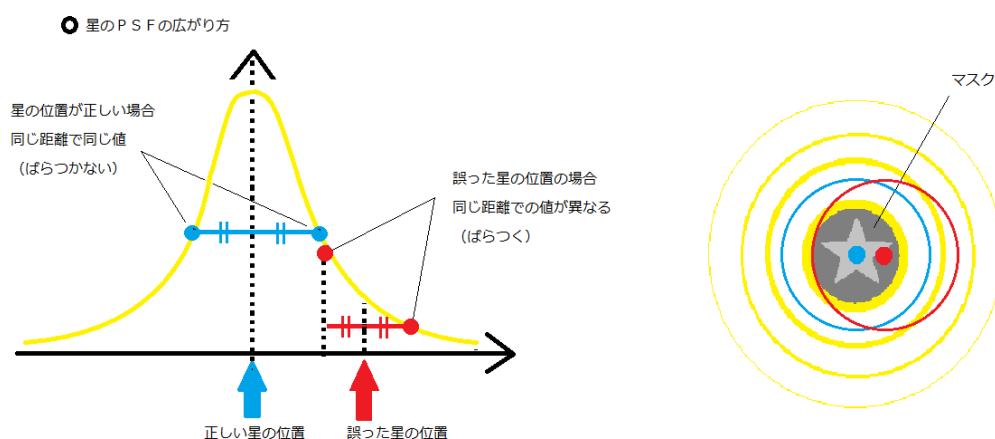


図 3.34: 星の PSF の広がり (左) マスクの中で星の位置が一致していた時としていない時の同心円 (右)

これを仮定し、星の位置の見積りを行った。星の位置を 図 3.35(c) の position1~6 の位置の間であると仮定し (マスク中心から回転中心)、半径 $0.8'' \sim 1.25''$ の範囲で I' の方位角方向における標準偏差を計算した。計算した範囲を半径 $0.8'' \sim 1.25''$ とした理由は、円盤寄与の少ない範囲で I' の標準偏差を求めるためである。図 3.35(a) は、 I' における半径 $0.8'' \sim 1.25''$ の位置を示した画で、図 3.35(b) は PI における半径 $0.8'' \sim 1.25''$ の位置を示した画である。この図からもわかるように、同範囲では I' に PI の寄与はほぼ無いと見てよい。ここで、見積りに使用したフレームは 55175 のフレーム (PSF の最も良い) と 55246 のフレーム (55175 との回転角が大きく、比較的 PSF が良い) の I' の 2 枚である。

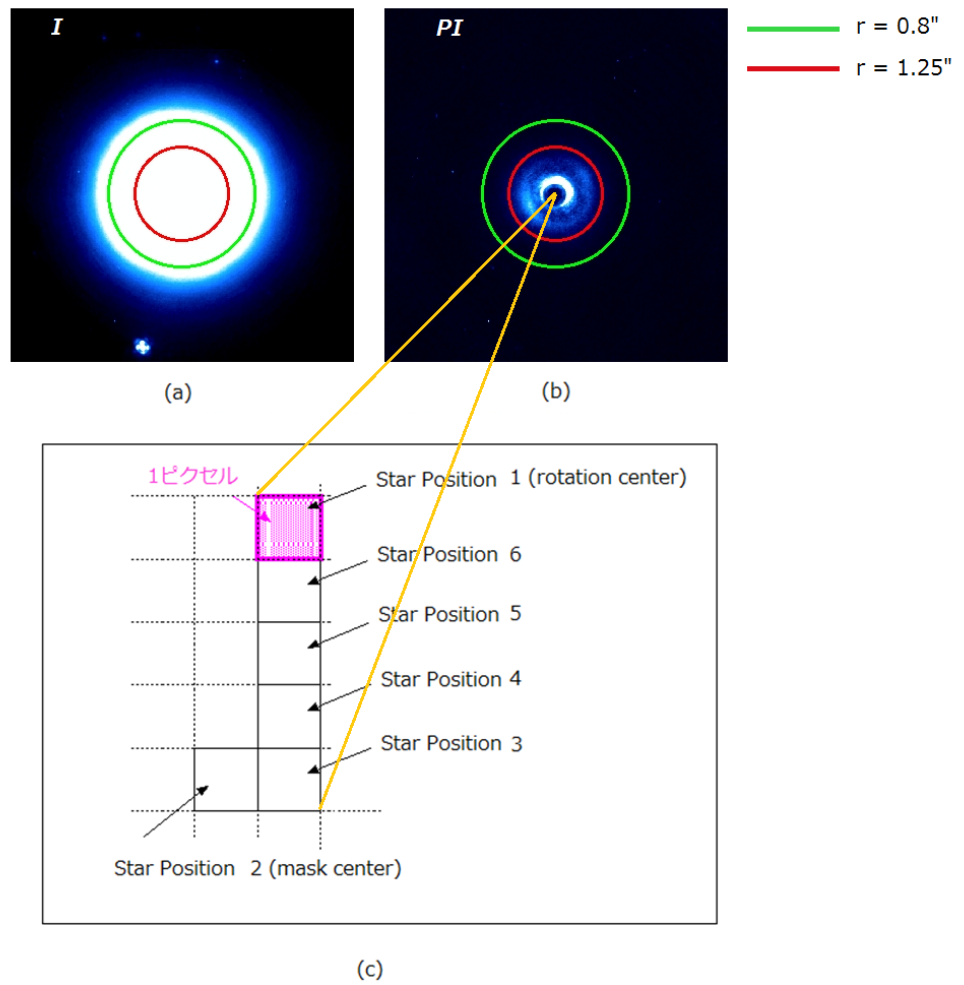
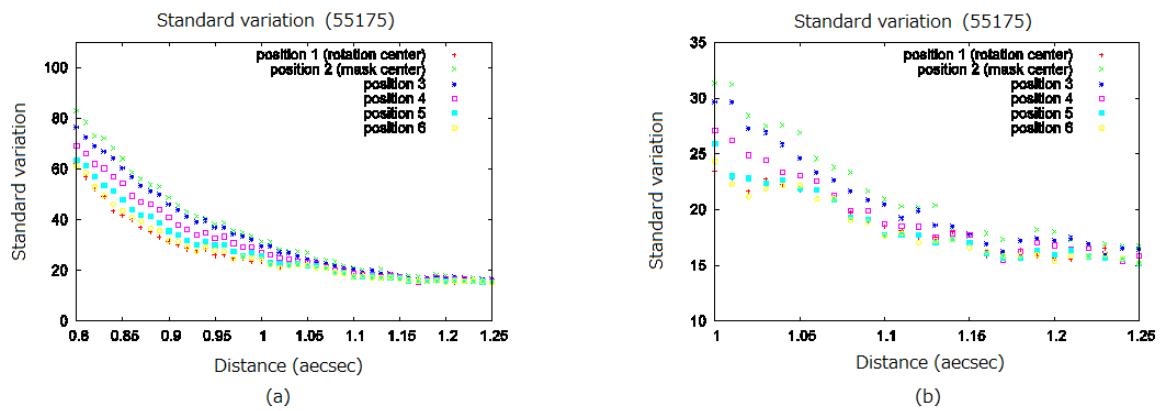


図 3.35: (a)(b) I と PI における半径 $0.8''$ から $1.25''$ の同心円 (c) 測定した中心位置



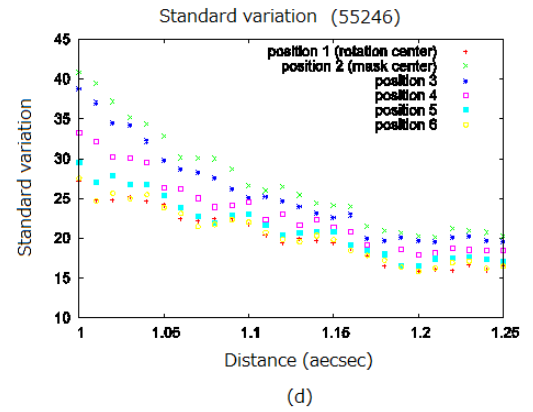
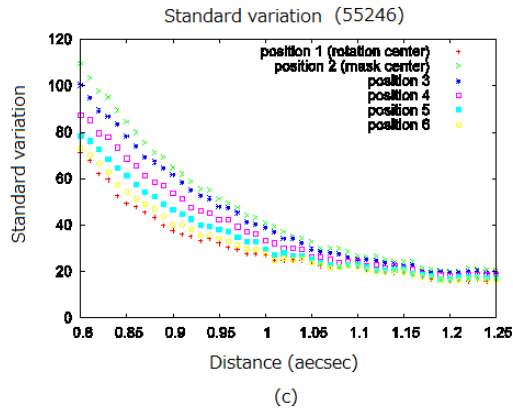


図 3.36: I における方位角方向の標準偏差 (a)55175 のフレーム (b)55175 のフレームの $r > 1''$ の範囲 (c)55246 のフレーム (d)55246 の $r > 1''$ の範囲

図 3.36(a) ~ 図 3.36(d) は、星の位置を position 1 ~ 6 としたときの標準偏差の動径分布を示したものである。ここで、回転中心は position1 であり、マスク中心は position2 とした (図 3.36(b) と図 3.36(d) は、図 3.36(a) と図 3.36(c) の半径 $r > 1''$ の部分を拡大したものである)。

この結果を見ると、マスク中心を星の位置とした時よりも、回転中心を星の位置とした時の方が、同心円における I' のばらつきが小さいという結果を得た。これより、PSF の広がりから見積もった星の位置は、回転中心の方が有力であると考えられ、本論文ではこののち、回転中心=星の位置として議論を進めた。

第4章 結果

4.1 偏光強度画像

解析の結果から得られた偏光強度の画像を図 4.1 に示した.

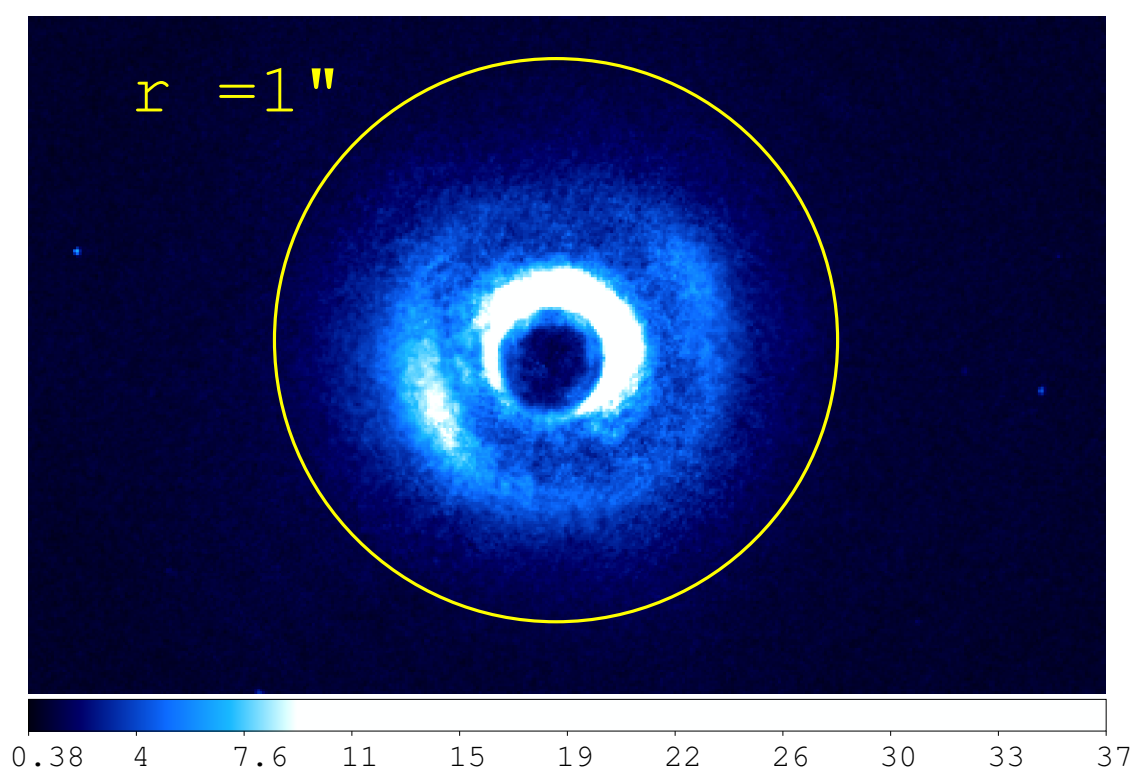


図 4.1: 偏光強度 PI [mJy/arcsec²]

この結果は、HD 169142 の周りにほぼ face on 構造の原始惑星系円盤が存在することを示した (図 3.32(a) と比較). この天体は過去の研究からも、周囲に face on の構造の円盤の存在が示唆されていた [7]. これと比較しても、解析結果に矛盾はなかった. また、図 4.1 の偏光強度画像におけるコロナグラフマスクと中心星の位置を図 4.2(a) に、位置角 5 度である円盤の長軸と短軸を図 4.2(b) に示した.

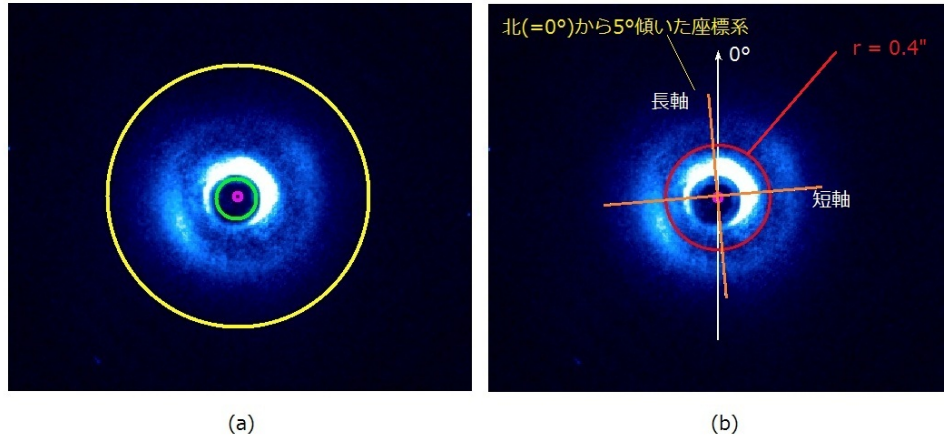


図 4.2: PI (a) ピンク：星の位置 (=回転中心) 緑：コロナグラフマスクの位置 (b) 円盤の長軸と短軸を示した PI

この円盤の構造を見ると、円盤散乱光の卓越している領域が、星の位置から半径 $0.45''$ を境にしてその内側と外側で見られ、半径 $0.45''$ 付近にはギャップ構造が確認された。以下では散乱光が卓越した円盤のギャップより星近傍の領域を“円盤内域”，外側の領域を“円盤外域”と記した。円盤外域部分では、方位角 100 度方向と 300 度方向付近で強い散乱光が確認された。両者の強度を比較すると、100 度付近の方がより明るく、非軸対称が見られた。また、円盤内域部分でも方位角 270 度～360 度方向で高い強度が見られ、非軸対称のようにも見られるが、星の位置がコロナグラフマスクの中心からずれているため (図 4.2a)，信頼性が低いと考えられる。これらの結果を定量的に示すため、動径分布と方位角分布をプロットした。

4.1.1 偏光強度の動径分布

図 4.3 は、星の位置を中心として、半径 $0.1''$ から $1.0''$ の範囲において方位角方向で平均した動径分布をプロットしたグラフである。半径 $0.1''$ から $0.15''$ までは、マスクで隠れた部分を示す。また、マスクの外であっても半径 $0.2''$ までの範囲は信頼度が低いので、今回は半径 $0.2''$ 以遠の議論を行った。

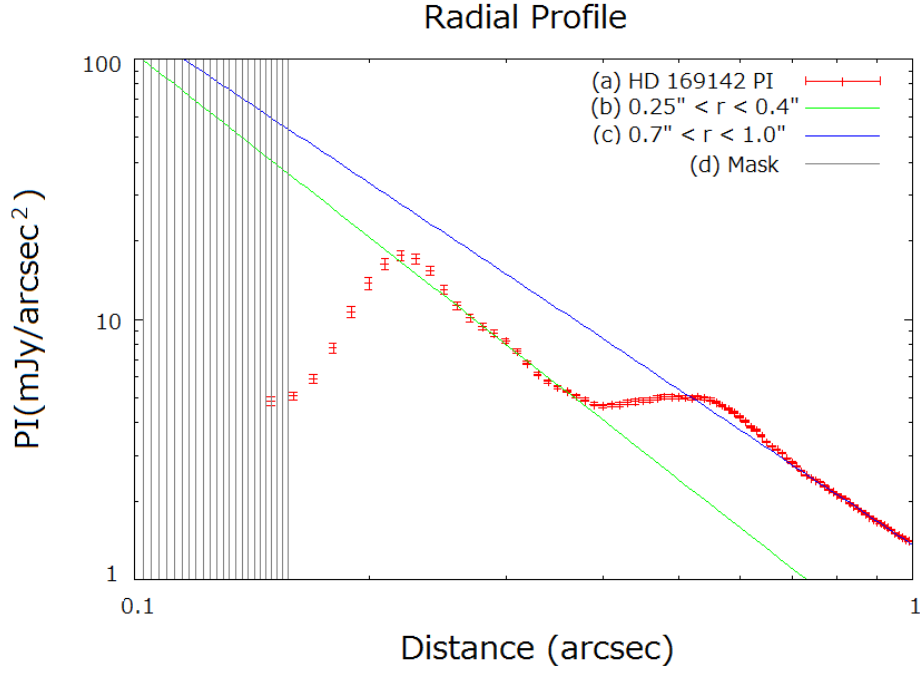


図 4.3: (a) 方位角方向で平均した動径分布. 横軸半径距離, 縦軸 PI をログスケールでプロットしたもの (b) (a) の $0.25'' < r < 0.4''$ の範囲でフィッティングした関数 (c) (a) の $0.7'' < r < 1.0''$ の範囲でフィッティングした関数 (d) コロナグラフィマスク

図 4.3 のグラフからは, 円盤内域である半径 $0.25''$ から $0.4''$ の範囲と, 円盤外域である半径 $0.7''$ から $1.0''$ の範囲で特徴的な構造が見られた. この両者の構造を single power law fit したところ, どちらもほぼ r^{-2} に従った (表 4.1). 更に図 4.2(b) でも見られるように, 半径 $0.45''$ 付近でギャップ構造を確認した.

	$0.25'' < r < 0.4''$	$0.7'' < r < 1.0''$
方位角で積分した動径分布	$0.48r^{-2.34}$	$1.36r^{-1.99}$

表 4.1: 長軸と短軸方向の動径分布の single power law fit 結果

さらに, 円盤の特に外域の非対称構造について議論するために, 円盤の長軸方向 (5 度と 185 度方向 (図 4.4ab)) と短軸方向 (95 度と 275 度方向 (図 4.4cd)) の動径分布をプロットした. この時, 方位角方向で積分した動径分布で, 特徴的な構造がみられた範囲 ($0.25'' < r < 0.4''$, $0.7'' < r < 1.0''$) において single power law fit を行い, そのフィッティング結果を表 4.2 に記した.

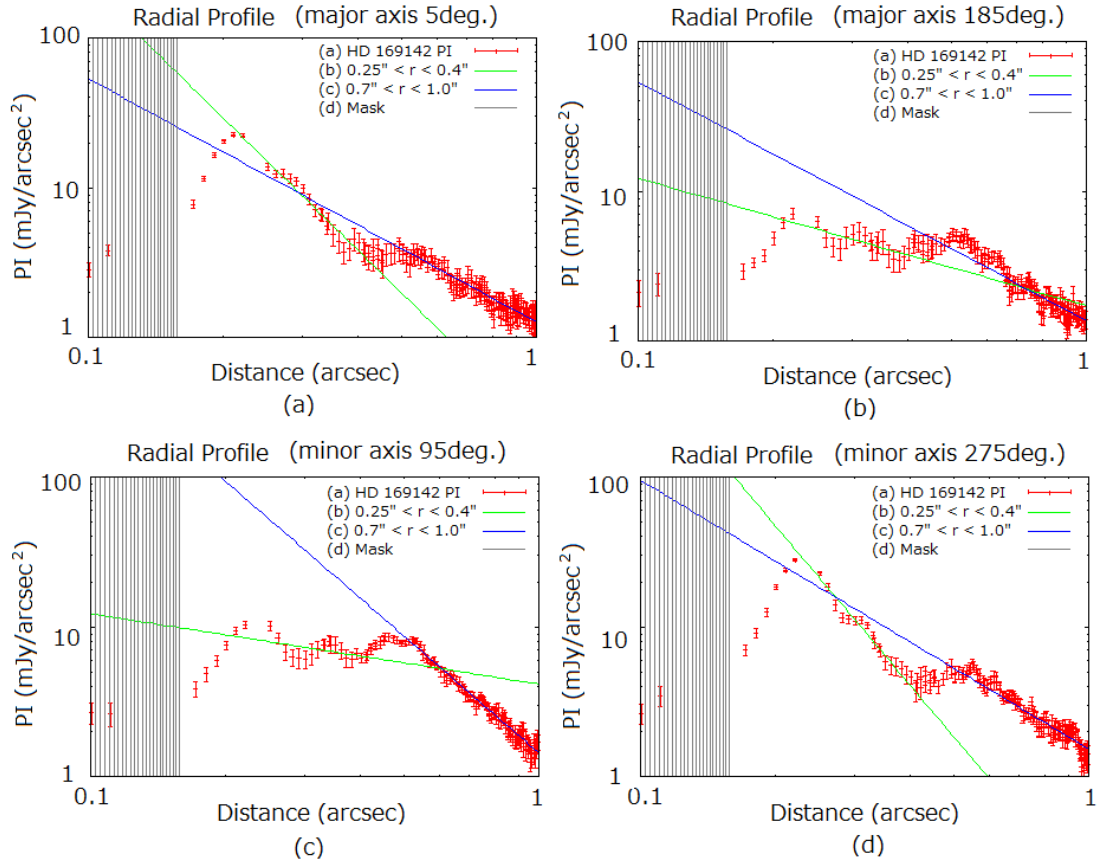


図 4.4: log スケールでプロットした動径分布 (a) 長軸方向 (5 度) (b) 長軸方向 (185 度) (c) 短軸方向 (95 度) (d) 短軸方向 (275 度)

	$0.25'' < r < 0.4''$	$0.7'' < r < 1.0''$
長軸 (5 度)	$0.26r^{-2.93}$	$1.27r^{-1.62}$
長軸 (185 度)	$4.15r^{-0.47}$	$1.44r^{-2.59}$
短軸 (95 度)	$1.72r^{-0.85}$	$1.37r^{-1.59}$
短軸 (275 度)	$0.16r^{-3.53}$	$1.53r^{-1.79}$

表 4.2: 長軸と短軸方向の動径分布の single power law fit 結果

これを見ると、各長軸と短軸でそれぞれ非軸対称性が見られた。

さらに、星から円盤内域および外域の極大値までの距離と、星からギャップの極小値までの距離を、各方位角方向で調べた。その結果を、図 4.5 にプロットした。

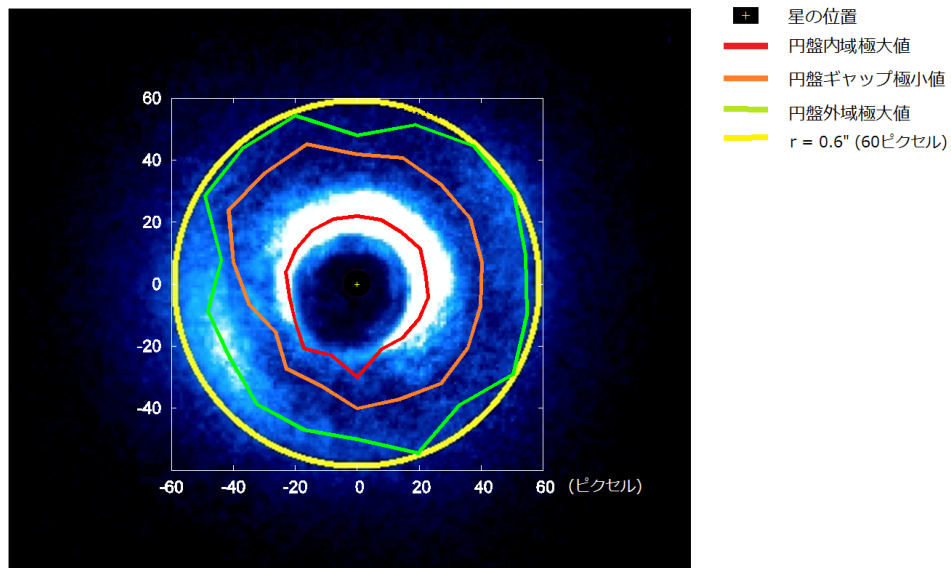


図 4.5: 円盤内縁と外縁の極大値と円盤ギャップの極小値

この結果から、円盤内域の極大値は概ね星から等距離に分布していたが(方位角 170 度 ~ 180 度方向の構造はマスクに近いので省く)、ギャップ構造の極小値と円盤外域の極大値は、方位角方向で星からの距離が異なった。

さらに、円盤ギャップ内に構造が見られた領域である方位角 50 度 ~ 230 度方向で積分した動径分布 (a) と、その長軸対称の領域である方位角 230 度 ~ 500 度方向で積分した動径分布 (b) を図 4.6 に示した。

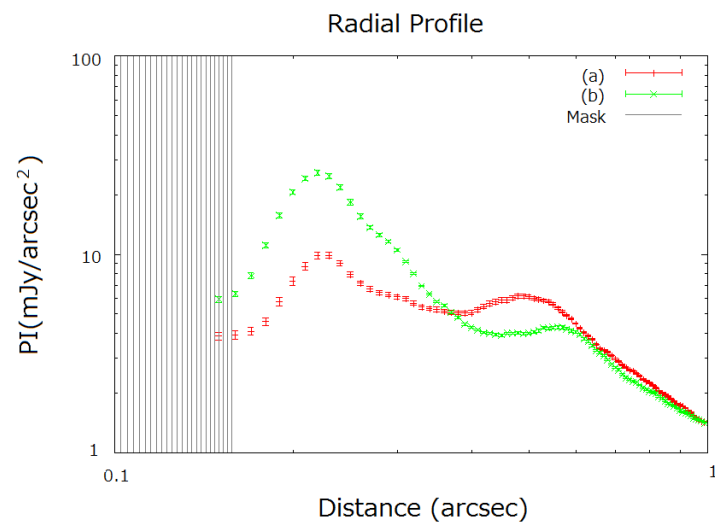


図 4.6: (a) 方位角 50 度 ~ 230 度で積分した動径分布 (b) 方位角 230 度 ~ 50 度で積分した動径分布

図 4.6 を見ると、(a) の領域でギャップ構造の内部に、円盤内域や外域とは分離した円盤構造が見られた。この構造は PSF 標準星から求めた PI との比較や、 S/N マップからも円盤散乱光が有意に検出されていた。一方で (b) の領域にはこの構造は見られず、(a) と (b) で非軸対称性を確認した。

これらの結果から、この円盤の非軸対称構造は有意なものであると言える。さらに、特徴的な構造が見られる半径において、方位角方向の分布をプロットした。

4.1.2 偏光強度の方位角分布

図 4.7(b) に示す半径において、方位角分布のプロットを行った。

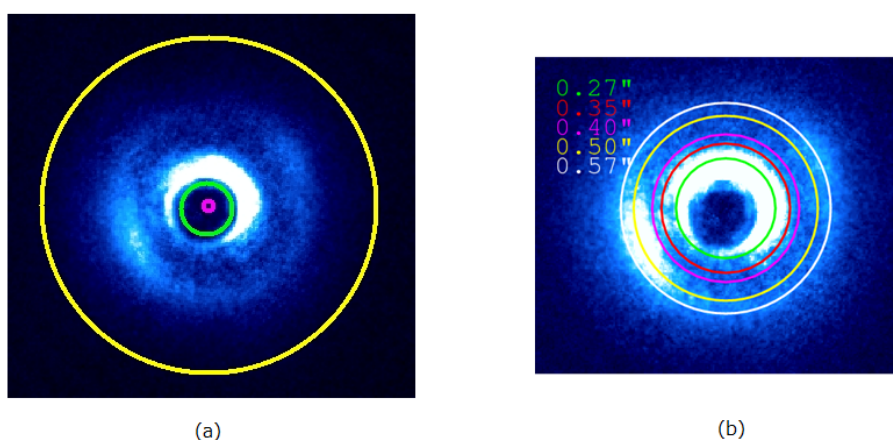


図 4.7: PI 画像 (a) ピンク:星の位置 緑:マスク 黄色:半径 $1''$ (b) 方位角分布をプロットした半径

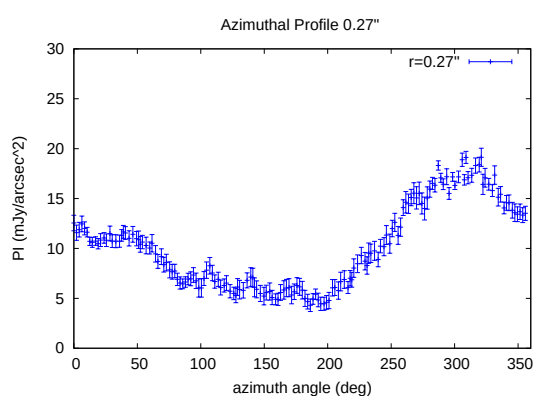


図 4.8: 方位角 $0.27''$ の方位角分布

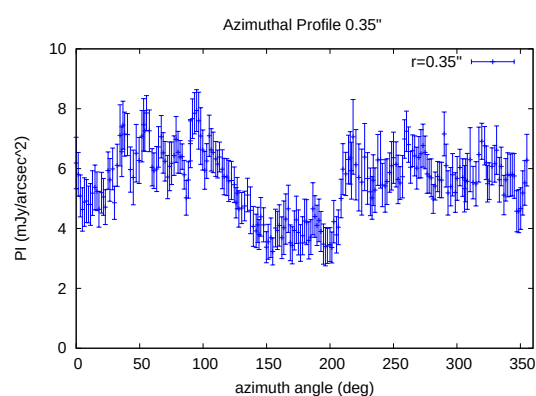


図 4.9: 方位角 $0.35''$ の方位角分布

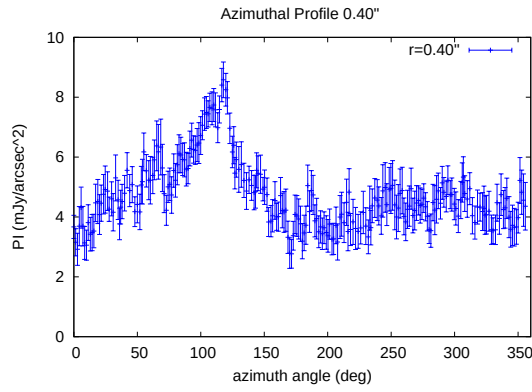


図 4.10: 方位角 0.40'' の方位角分布

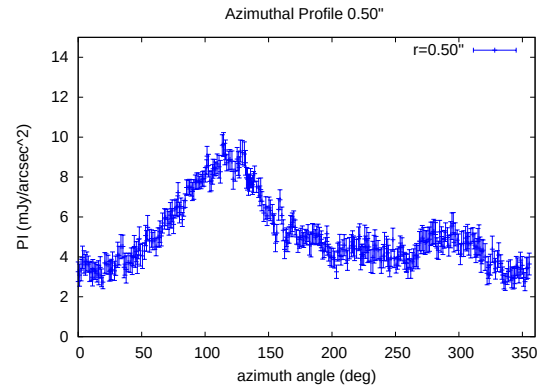


図 4.11: 方位角 0.50'' の方位角分布

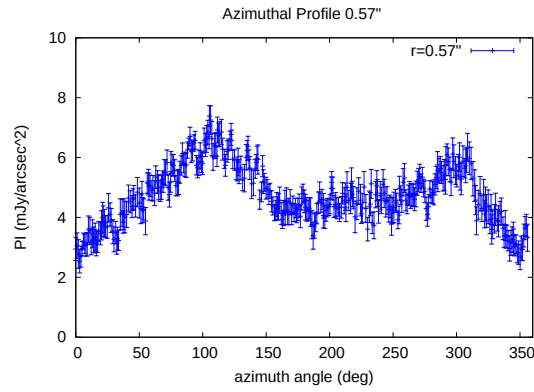


図 4.12: 方位角 0.57'' の方位角分布

方位角分布をプロットした結果からも非軸対称性を確認した．さらに円盤内域と外域で比較するために，内域の方位角分布のプロットを図 4.13 に，外域のプロットを図 4.14 に示した．

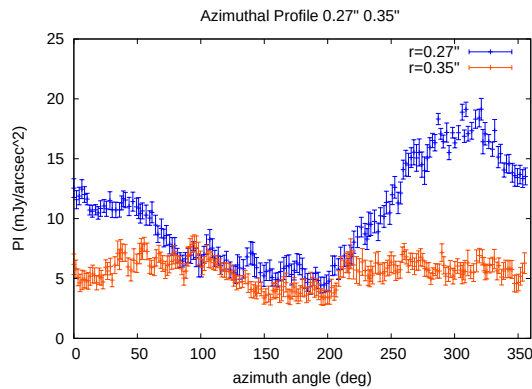


図 4.13: 方位角 0.27'' 0.35'' の方位角分布

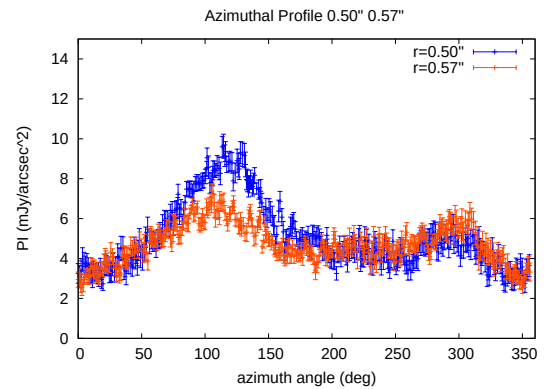


図 4.14: 方位角 0.50'' 0.57'' の方位角分布

この結果から，内域と外域部分に異なる非軸対称性を見ることができた (内域部分に関しては星

の位置がマスク中心からずれていることもあり、この非対称は信頼性が低い可能性がある)。しかし、外域部分には顕著な非軸対称性 (特に半径 $0.5''$ のプロット) が見られた。

4.1.3 偏光角

円盤散乱光の直線偏光の偏光角は、式 (4.1) のように表される。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right) \times \frac{180}{\pi} \text{ [deg]}. \quad (4.1)$$

円盤散乱光は、中心星から放射された光がダストに入射する方向と垂直に直線偏光するので、理論的には図 4.15 のようになると予想される。

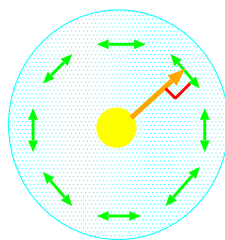


図 4.15: 理想的な場合の直線偏光のベクトルの向き

図 4.17 は HD 169142 の偏光角を計算し、そのベクトルマップを描いた画である (ベクトルマップを描いた範囲を図 4.16 の *PI* 画像中に示した)。

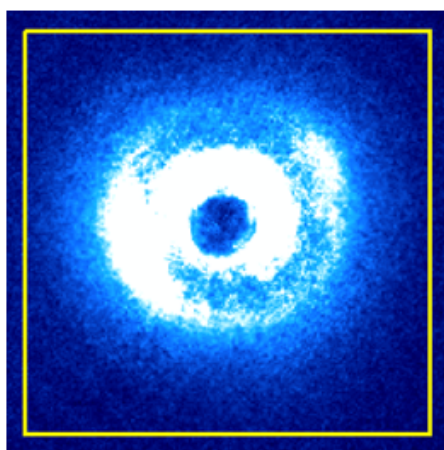


図 4.16: *PI* における偏光角を計算した領域

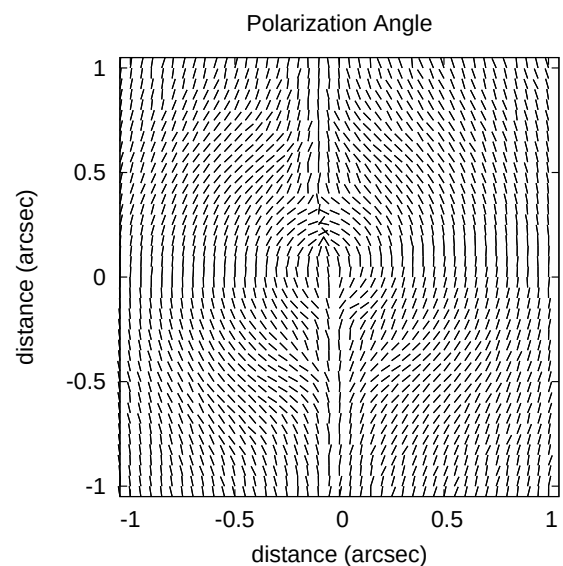


図 4.17: 偏光角のベクトルマップ

図 4.17 を見ると、face on 構造の円盤において、理論的に予想されているベクトルマップにほぼ近い結果が得られた。

ここで、図 4.18(a) の領域について局所的なベクトルマップを描いた。この領域では、ギャップの内部に円盤散乱光が有意に検出された。仮にこの領域に惑星があった場合、自身が熱放射をしていて、その放射が周囲のダストによって散乱され、観測された可能性が考えられる。その場合は図 4.18(a) の領域での偏光角は、惑星の熱放射がダストに入射する向きに直交する角度で現れると予想される。これを検証するため、偏光角を計算し、結果を図 4.18(c) に示した。

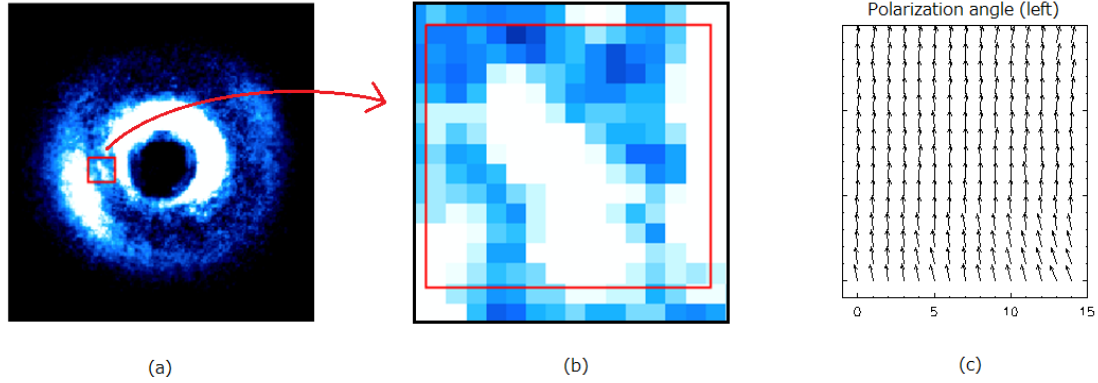


図 4.18: (a)(b) ギャップ左領域の位置 (c) ギャップ左領域の偏光角

この結果からは、目立った構造を確認することはできなかった。

4.1.4 偏光度の下限值

偏光度とは、検出した全強度に対する偏光成分の割合を示した量であり、式 (4.2) の形で表される。ここでの検出した全強度とは、中心星の光を除去した円盤の強度に相当する。このためにまずは、 I_{disk} の導出する必要がある。HD 169142 のデータから導出した I は、 $I_{\text{disk+PSF}}$ であり、中心星の光が混在している。 $I_{\text{disk+PSF}}$ から I_{disk} を求めるためには、PSF 標準星から導出した I_{PSF} を差し引く必要がある。このため、PSF 標準星のデータを解析し、 I_{PSF} を算出した。しかし今回 PSF 標準星のデータが不十分であったことにより、正確な I_{disk} を求めることができなかった。よって今回は、式 (4.3) を用いて、偏光度の下限値を求めるに留まった。

$$P = \sqrt{\left(\frac{Q}{I_{\text{disk}}}\right)^2 + \left(\frac{U}{I_{\text{disk}}}\right)^2} \times 100. \quad (4.2)$$

$$P = \sqrt{\left(\frac{Q}{I_{\text{disk+PSF}}}\right)^2 + \left(\frac{U}{I_{\text{disk+PSF}}}\right)^2} \times 100. \quad (4.3)$$

この結果、円盤内域部分が最も偏光度が高く、8%の偏光度を得た。

4.2 結果のまとめ

本研究は、原始惑星系円盤を伴うことが知られていた前主系列星 HD 169142 について [7]、円盤の詳細な空間構造を検証する目的で解析を行った。これまでの解析の結果を以下にまとめる。

HD 169142 の近赤外撮像データを解析行い、偏光強度を求めた結果、HD 169142 から半径 $0.25'' < r < 1.0''$ の領域において円盤散乱光を検出し、特に半径 $0.45''$ 付近ではギャップ構造を確認した (図 4.1). この偏光強度画像において、方位角方向で積分した動径分布を描いた結果、円盤内域 $0.25'' < r < 0.4''$ と外域 $0.7'' < r < 1.0''$ の領域で、共に概ね r^{-2} のべき乗則に従った (図 4.3, 表 4.1). しかし、円盤の長軸方向と短軸方向それぞれの動径分布を描いた結果からは、それぞれの方向で r^{-2} に従うとは限らなかった (図 4.4, 表 4.2). 更に、星から円盤内域及び外域の極大値までの距離と、星からギャップの極小値までの距離を求めた結果、星からギャップの極小値と円盤外域の極大値までの距離は、星の同心円上に分布しておらず (図 4.5), 円盤は非軸対称構造であった. これは、各半径での方位角分布の結果からも裏付けられる構造であった. 方位角 95 度方向、半径 $0.45''$ の領域に位置するギャップ構造内の散乱光について調べるため、方位角 90 度 ~ 110 度方向で積分した動径分布を描いた結果、ギャップ内の円盤散乱光は確認されたが、その軸対称方向の 270 度 ~ 290 度方向の動径分布には、ギャップ内に構造は見られなかった (図 4.6). これからも、非軸対称構造を確認した.

4.3 議論

図 4.19 は、本研究によって新たに得られた情報をもとに、予想される HD 169142 に伴う原始惑星系円盤の断面図を示した図である. これまでの解析結果をふまえ、円盤構造に関する議論を行った.

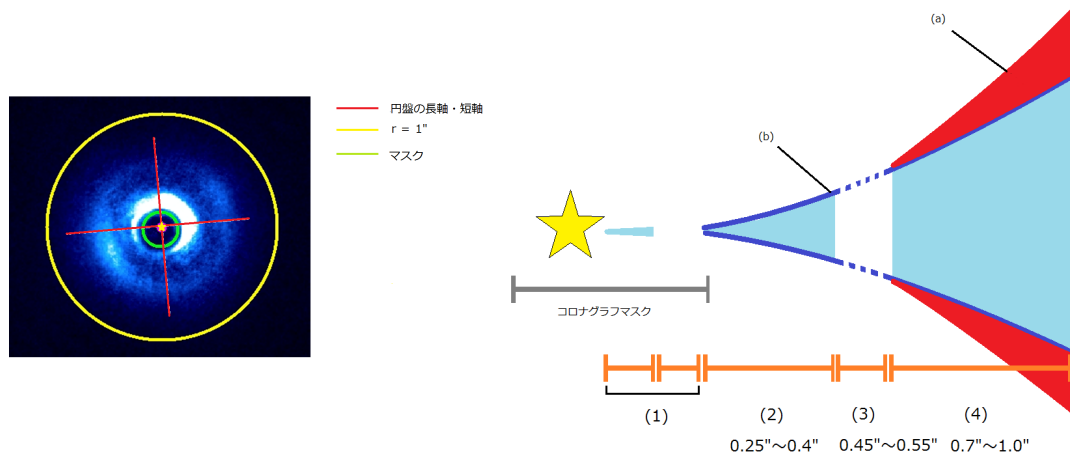


図 4.19: HD 169142 原始惑星系円盤構造

図 4.19(右) の (1) は、コロナグラフで隠れていた領域である. 次に (2) の領域では、少なくとも半径 $0.2'' \sim 0.35''$ に広がった円盤内域を確認した. (3) では、ギャップ構造が見られた. このギャップ構造の極小値は、星の同心円上に分布していなかった. また、方位角 90 度 ~ 110 度方向にはギャップの内部に散乱面積の大きい領域を確認した. これらより、ギャップ構造が非軸対称構造であることを確認した. (4) は円盤外域であり、偏光強度の非軸対称性が確認された.

まずはじめに、半径 $0.45''$ 付近のギャップ構造について議論する. HD 169142 に伴う原始惑星系円盤は、(ガス質量) / (ダスト質量) = 100 の [9], ガスが卓越した円盤である. このような状態の

円盤である場合、ギャップ構造が生成される理由としては、光蒸発によるものか、もしくは惑星がギャップ上を公転している場合が考えられる [8].

ここで光蒸発とは、中心星からの放射によって円盤中の固体塵が蒸発することで円盤の面密度が減少し、その結果ギャップが生じる現象である。これは、星からの光により電離されたガスが運動しながら、星の重力を振り切って宇宙空間に逃げることで半径付近で最も活発に行われ、その場でギャップが生じると考えられている。星の光が等方的に放射していると考え、光蒸発によって生じたギャップは、星の同心円上に生成されると考えられる。これに対して今回の結果は、図 4.4 や図 4.6 から、星からギャップの極小値までの距離が、方位角方向で異なる。この傾向は、光蒸発から考えられる傾向とは異なっていた。このことから、ギャップ内に惑星が存在し、公転している可能性が示唆される。

次に、円盤の内域と外域の散乱効率の差について議論する。表 4.3 から、方位角方向で積分した動径分布において、内域 $0.25'' < r < 0.4''$ と外域 $0.7'' < r < 1.0''$ で、single power law fit した結果は r^{-2} のべき乗則に従ったが、円盤の内域と外域ではフィットした関数のべき指数が異なった。例えば、単調にフレアアップしている円盤を仮定した場合に、動径分布は図 4.20(右) の (a) のようなグラフが考えられ、そこにギャップが伴った場合は (b) の形状が考えられる。しかし、実際の動径分布からはこのような結果は得られなかった。これは円盤内域に比べ、外域の散乱効率が大きいことを示す。

散乱効率が異なる理由として考えられる一つとしては、円盤構成ダスト自身の散乱効率は円盤内域と外域で同一であるが、外域の円盤が急にせり上がっている構造である場合である。図 4.19(右) のように、外域部分 (a) が (b) に比べてせり上がっている状態であるとする、外域の散乱効率が大きくなると考えられる。もう一つは、円盤内域と外域の構成ダストの性質が異なることによる散乱効率の違いである。円盤の形状が単調にフレアアップしているとしても、円盤ダストの性質の違いによって散乱効率の違いが生じた可能性が考えられる。

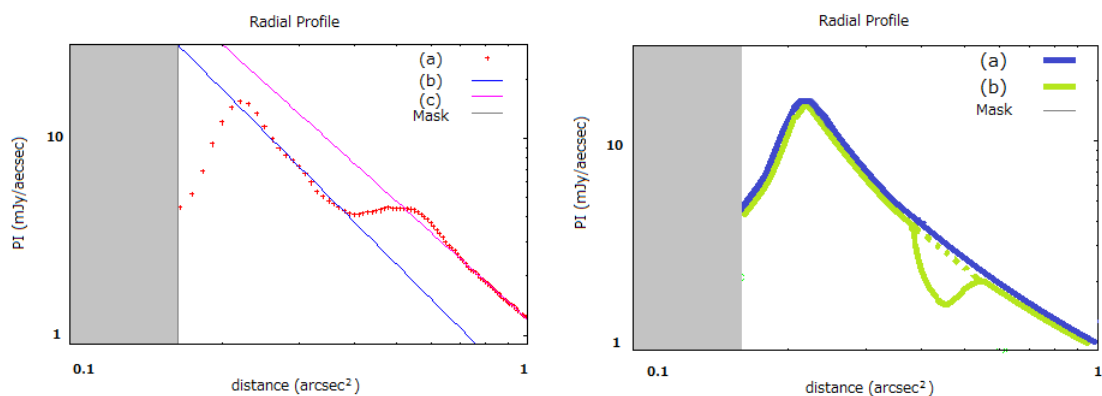


図 4.20: (左)HD 169142 の方位角方向で積分した実際の動径分布 (右) 単調にフレアアップしている円盤を仮定した場合の動径分布

最後に、円盤の非軸対称性について議論する。図 4.4 や表 4.2 を見ると、長軸と短軸各方向で、非軸対称性が見られた。また、図 4.5 や図 4.6 から、円盤非軸対称性が確認された。

これより、HD 169142 の原始惑星系円盤は、非軸対称である円盤構造を持ち、ギャップ構造、円

盤外域構造は共に中心星から同心円上に分布していなかった。これらの構造は光蒸発から生成されたとは考えにくく、惑星の存在可能性を示唆する結果となった。

4.4 まとめ

本研究では、Subaru/HiCIAOにより取得された前主系列星 HD 169142 の赤外撮像データを解析し、そこに付随する原始惑星系円盤の空間構造の検証を行った。今回用いた HD 169142 の観測データは、精度よく円盤散乱光 (直線偏光光) を取得するために、PDI + ADI モードで取得された。解析では、観測データに含まれるノイズや中心星の光、人工的な要因で含まれる偏光光等の除去を行った。解析の結果、偏光強度を示す PI の画像を取得した。偏光強度画像からは、少なくとも星から半径 $0.8''$ に広がった円盤を確認し、半径 $0.45''$ 付近ではギャップ構造を確認した。さらに、ギャップを挟んだ円盤の内域と外域のうち、円盤外域構造で非対称性が見られ、 $\theta = 95^\circ$ の表面輝度に対し、 $\theta = -85^\circ$ 方向は約 60 %、 $\theta = 5^\circ$ 方向は約 30 %であった。これらの非軸対称性は光蒸発では説明が難しいため、ギャップ内部に惑星の存在を示唆する結果となった。

付 録 A PSF 標準星 HD166903 の解析

A.1 解析

ここでは、HD 169142 の PSF 標準星である HD 166903 の解析経過を参考までに載せた。PSF 標準星は、サイエンス天体との比較に用いるため、解析方法は サイエンス天体と同じ方法で行う必要がある。

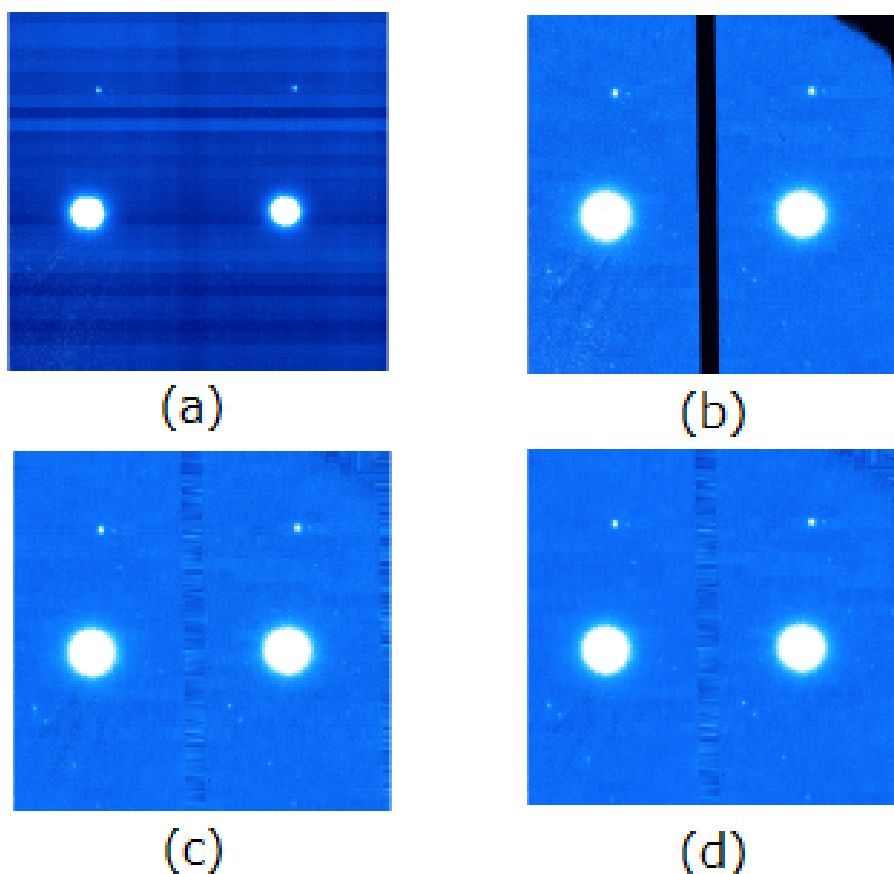


図 A.1: (a)HD 166903 生データ (b) バイアス縞を除去したフレーム (c)HD 169142 の解析で
用いたフラットフレームを用いて規格化したフレーム (d) バッドピクセル除去後のフレーム

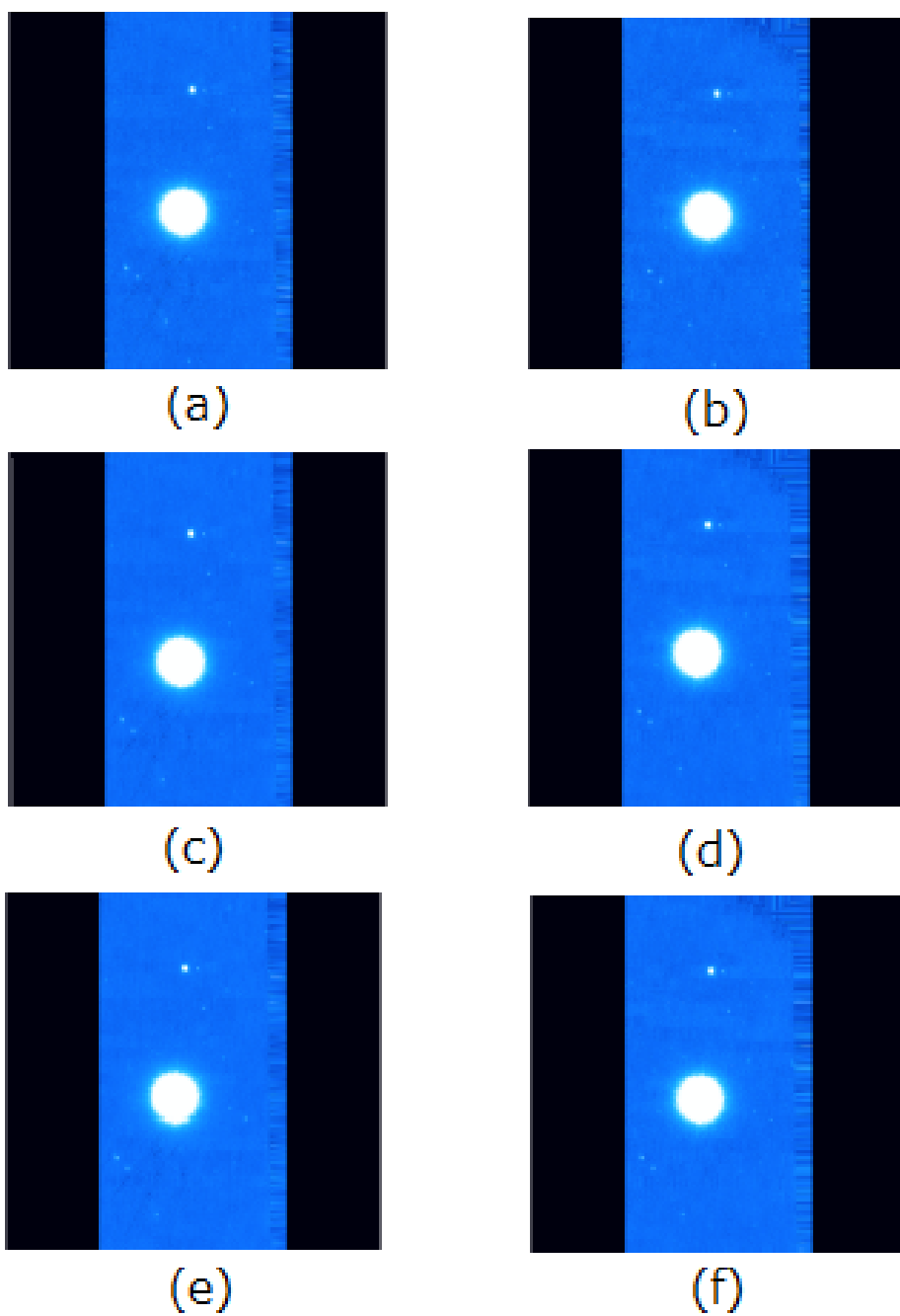


図 A.2: (a) 垂直成分 (b) 水平成分 (c) 位置合わせと歪み補正後の垂直成分 (d) 位置合わせと歪み補正後の水平成分 (e) 背景光の引き残り除去後の垂直成分 (f) 背景光の引き残り除去後の水平成分

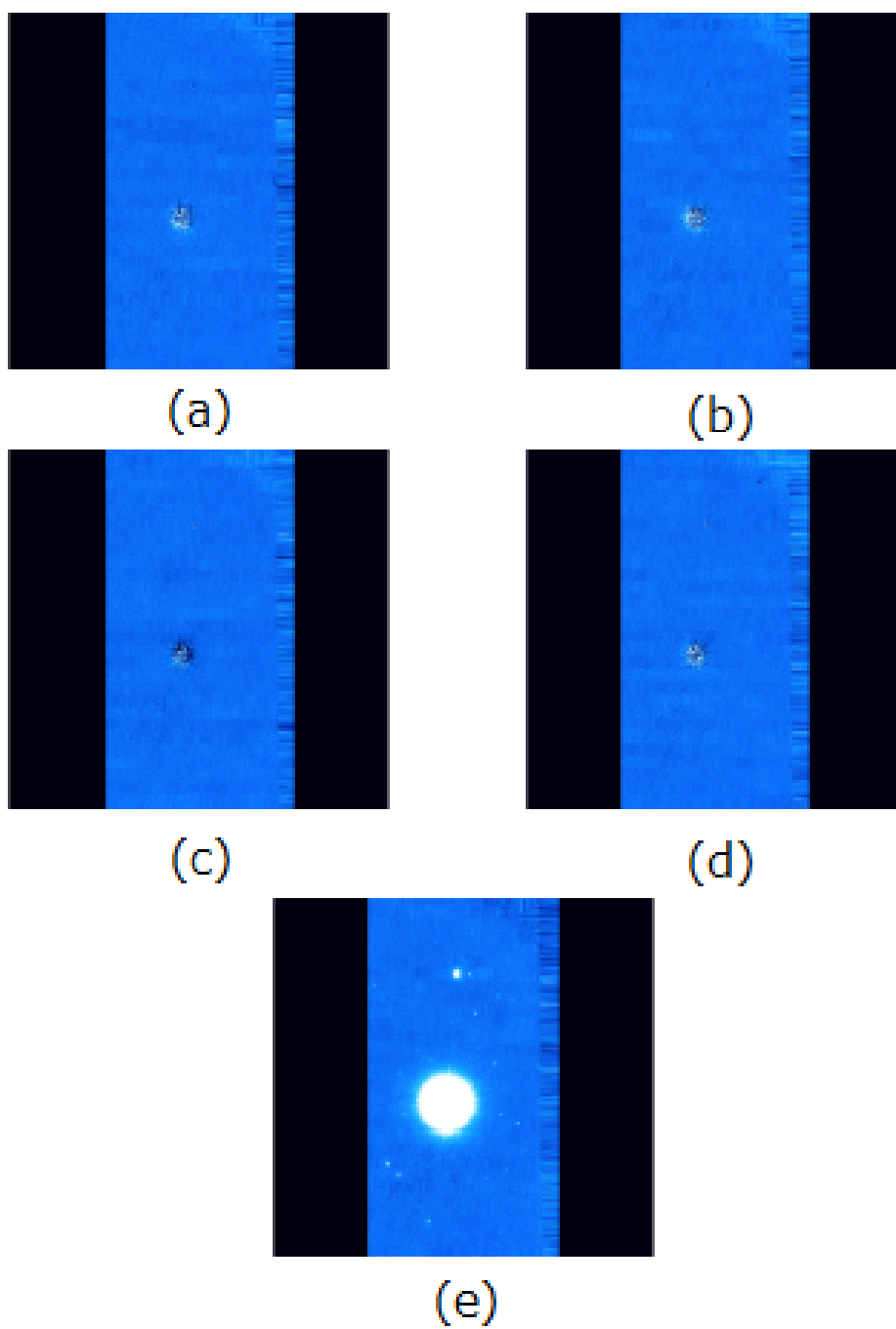


図 A.3: 器械偏光を含むストークスパラメータの導出 (a) Q' (b) $-Q'$ (c) U' (d) $-U'$ (e) I'

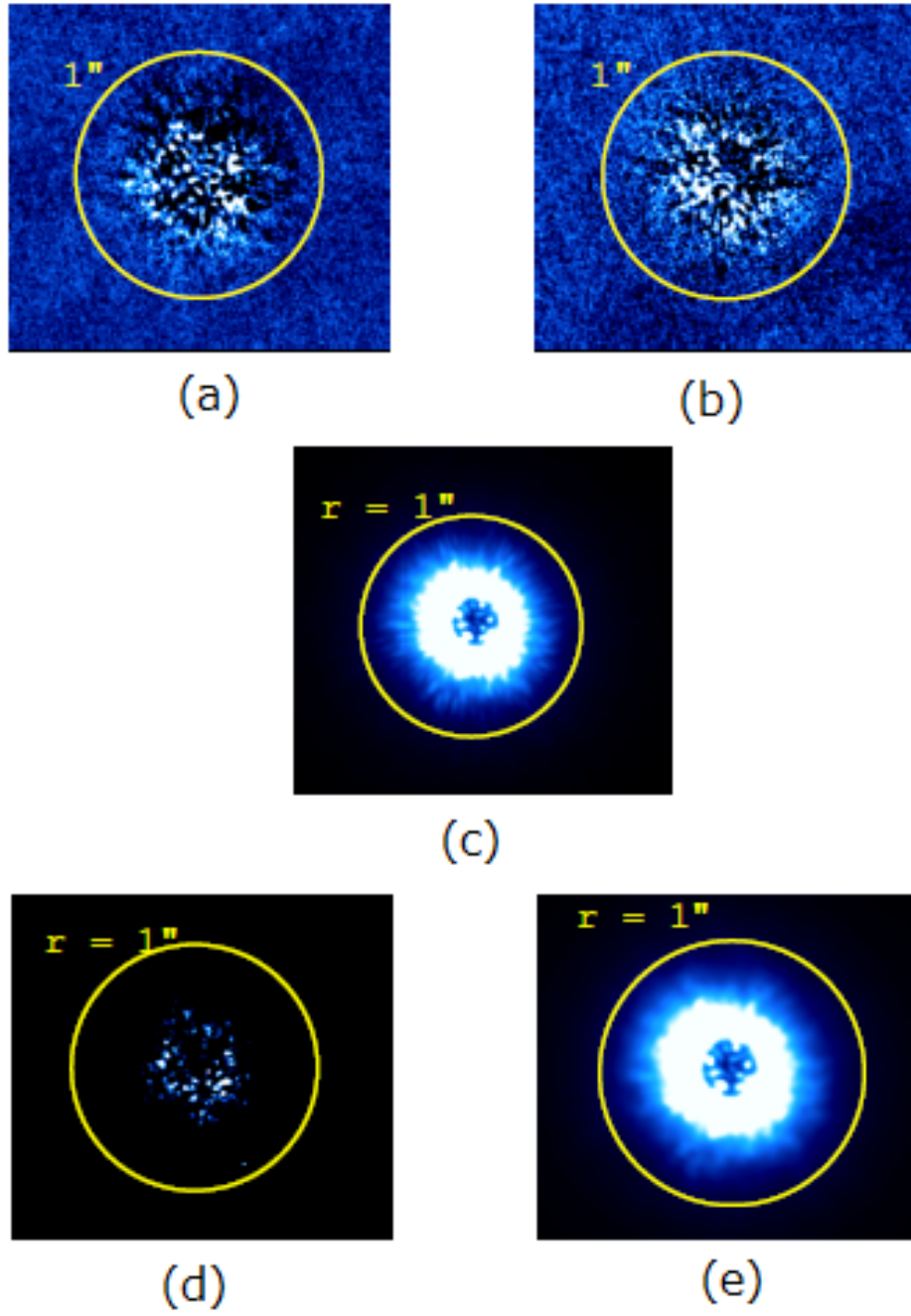


図 A.4: (a) 器械偏光補正後 Q (b) 器械偏光補正後 U (c) 器械偏光補正後 I (d) PI を導出したのち平均化したフレーム (e) 平均化した I のフレーム

HD 169142 と PSF 標準星の PI において、方位角方向で積分した動径分布を比較した結果を図 A.5 に示した。

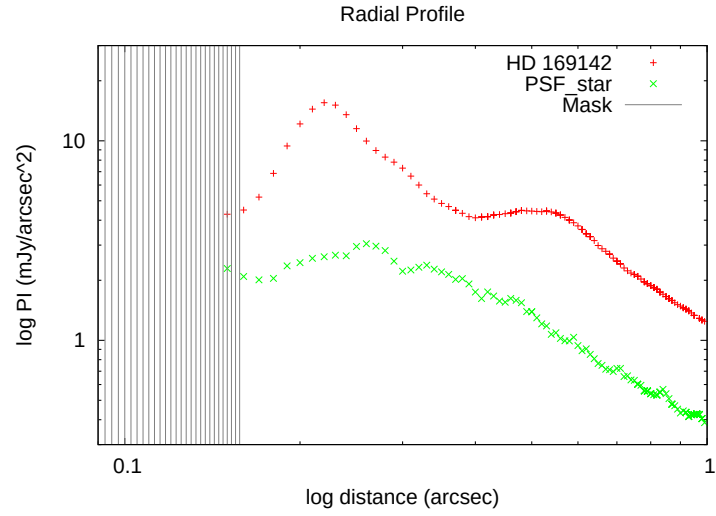


図 A.5: HD 169142 の PI と PSF 標準星の PI の比較

この結果, HD 169142 の円盤散乱光が検出されたことが示された.

A.2 PSF 標準星の回転中心の算出

HD 166903 のデータにも, 図 A.6 で示す位置に明るい背景星が写っていたので, HD 169142 で行ったのと同様の方法で回転中心を求めた.

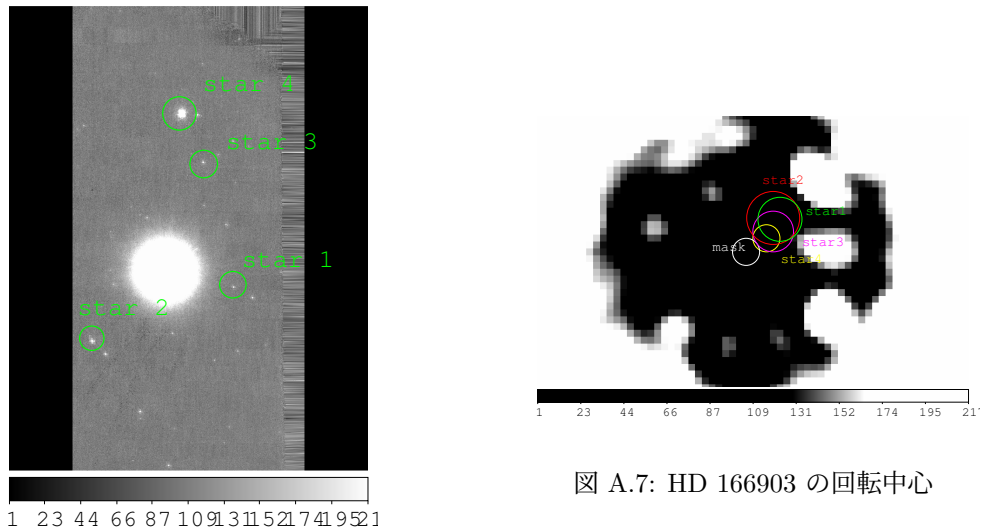


図 A.7: HD 166903 の回転中心

図 A.6: HD 166903 の背景星の位置

背景星 star1 ~ star4 を用いて回転中心を導出した. その標準偏差が小さい座標に重みを付け,

平均をとった回転中心の座標は、 $(x, y) = (412.7, 882.2)$ であった。マスク中心は $(x_{\text{mask}}, y_{\text{mask}}) = (415, 885)$ であったので、マスク中心から x 軸方向に-2.3 ピクセル、 y 軸方向に 2.8 ピクセルずれた結果となった (この時の x 軸は方位角 270 度方向、 y 軸は方位角 0 度方向を示す)。

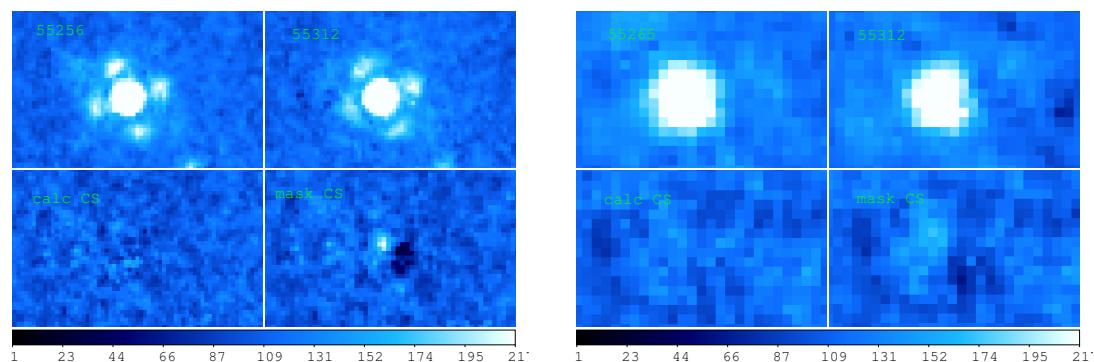


図 A.8: 回転中心を計算値とマスク中心にしたときの I の比較 図 A.9: 回転中心を計算値とマスク中心にしたときの I の比較

図 A.8 の左上は HD 166903 の始めに撮られたフレームで、右上は一番最後に撮られたフレーム。左下は回転中心で右上の画像を回し、左上から引いたもの。右下は回転中心をマスク中心にして同様の作業を行ったもの。図 A.9 は異なる背景星で図 A.8 と同じ操作を行ったもの。両者とも、計算した回転中心を回転中心にして背景星の引き算を行ったものの方が綺麗に引けていた。(背景星の位置が合っていた)

付 録 B 偏光度

偏光度とは，検出した全信号に対する偏光成分の割合を示した量であり，式 (B.1) の形で表される．

はじめに， $I_{\text{disk+PSF}}$ を用いて偏光度の下限値を計算した (式 (B.2)).

$$P = \sqrt{\left(\frac{Q}{I_{\text{disk}}}\right)^2 + \left(\frac{U}{I_{\text{disk}}}\right)^2} \times 100. \quad (\text{B.1})$$

$$P = \sqrt{\left(\frac{Q}{I_{\text{disk+PSF}}}\right)^2 + \left(\frac{U}{I_{\text{disk+PSF}}}\right)^2} \times 100. \quad (\text{B.2})$$

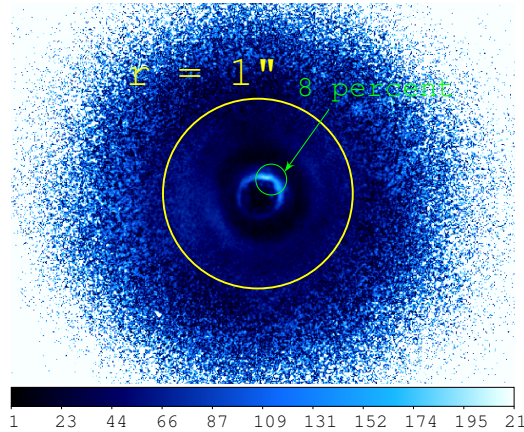


図 B.1: 偏光度下限値

この結果，円盤内縁部分が最も偏光度が高く，8 %の偏光度を得た．

さらに正確な偏光度を求めるため，HD 169142 の円盤の I である I_{disk} を求めた．

1. HD169142 の PSF の広がり方の形に，PSF 標準星である HD166903 の PSF の広がり方を合わせる．

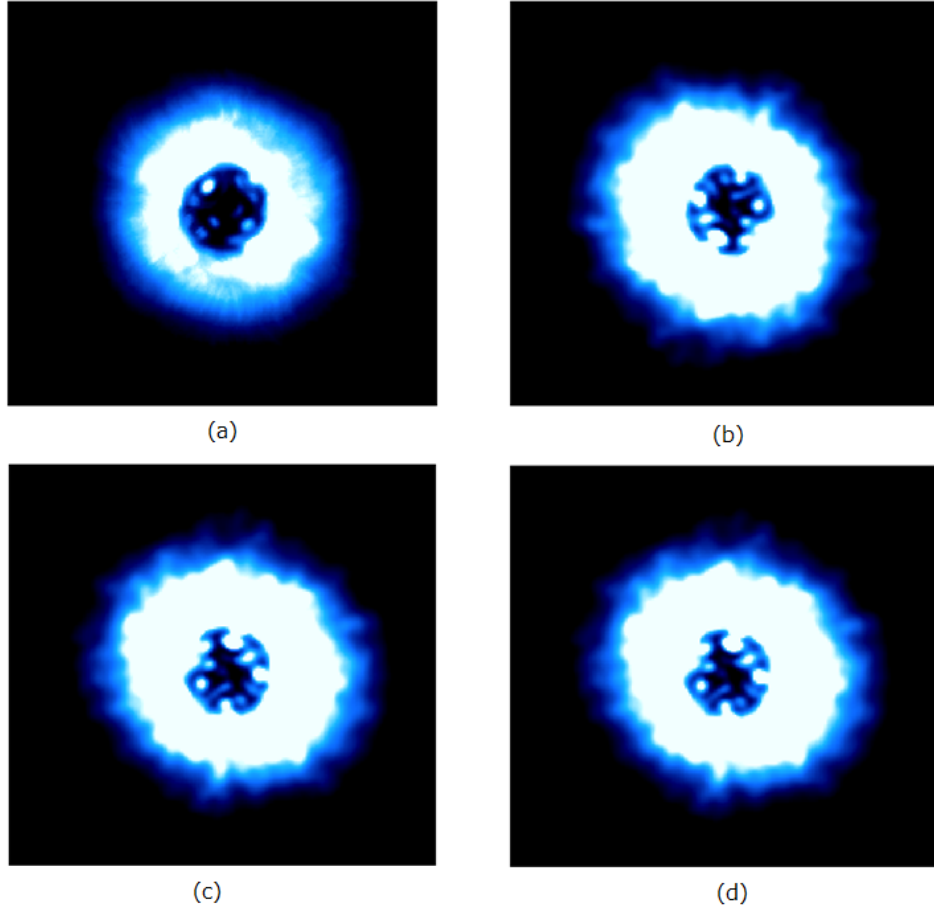


図 B.2: (a)HD 169142 の I (b)HD 166903 の I (c)HD 166903 の I を 195 度回転させる (d)HD 166903 の I の中心の位置を HD169142 に合わせる

2. HD166903 のスケールを HD169142 に合わせる.

HD166903 は H バンドの絶対強度 5.837, HD169142 は 5.837 である (SIMBAD より). ポグソン法則より,

$$m_1 - m_2 = -2.5 \times \log \left(\frac{F_1}{F_2} \right) \quad (\text{B.3})$$

ここで, m_1 は HD 169142 の絶対等級, m_2 は HD 166903 の絶対等級, F_1 は HD 169142 のフラックス, F_2 は HD 166903 のフラックスを指す. これより,

$$F_2 = 2.6896 \times F_1 \quad (\text{B.4})$$

また, HD 169142 の露光時間は 30 秒, HD166903 の露光時間は 15 秒であるので,

$$F_1 = F_2 \times 2 \times \frac{1}{2.6896} \quad (\text{B.5})$$

$$= 0.7436 \times F_2 \quad (\text{B.6})$$

となる．この結果を用いて， I_{disk} を計算した結果が図 B.3(左) である．

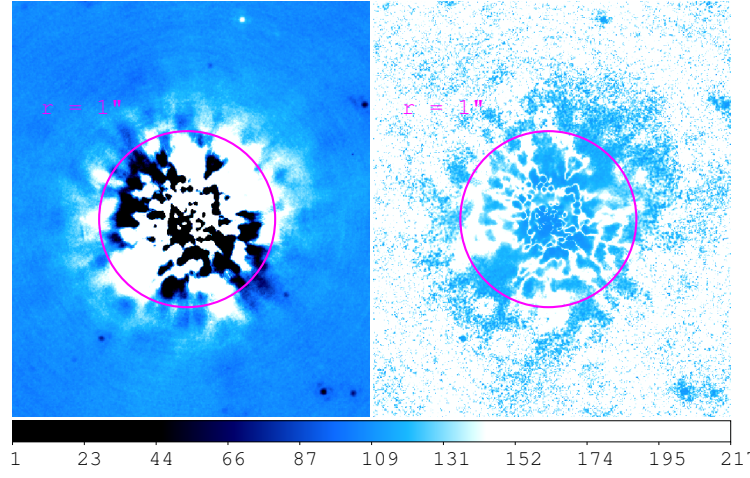


図 B.3: 絶対等級の比から出した I (円盤)(左) と偏光度 (右)

これでは， I が負の値になっている部分があるので，引きすぎてしまっていた．

3. 最適な I_{disk} を出すために，PSF 標準星の I を定数倍して， I_{disk} を計算した．

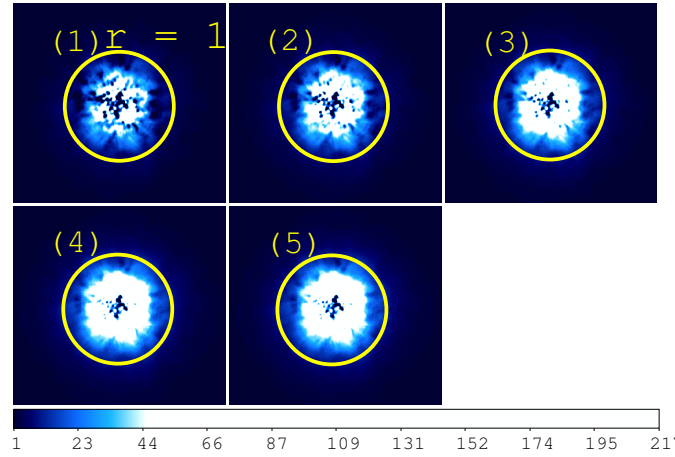


図 B.4: (1)PSF 標準星 0.6 倍 I_{disk} (2)PSF 標準星 0.55 倍 I_{disk} (3)PSF 標準星 0.5 倍 I_{disk} (4)PSF 標準星 0.45 倍 I_{disk} (5)PSF 標準星 0.4 倍 I_{disk}

図 B.4 の I_{disk} を用いて，偏光度を計算した結果が図 B.5 である．

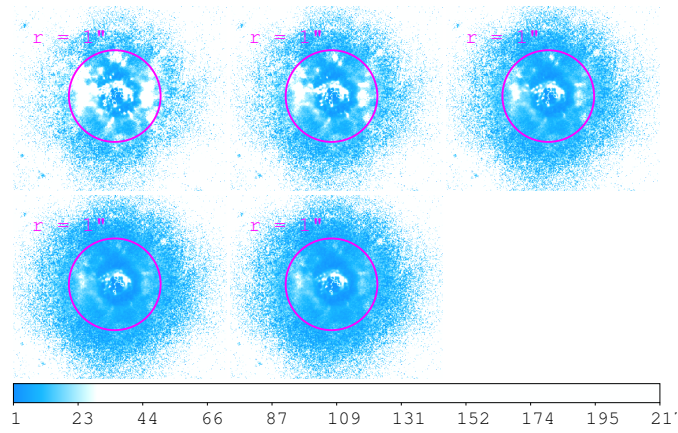


図 B.5: (1)PSF 標準星 0.6 倍 P (2)PSF 標準星 0.55 倍 P (3)PSF 標準星 0.5 倍 P (4)PSF 標準星 0.45 倍 P (5)PSF 標準星 0.4 倍 P

ここまで偏光度を求めるために、PSF 標準星の I の差し引きを行ったが、PSF 標準星のデータが不十分であったため、正しい I_{disk} を計算するには至らなかった。よって、本解析では偏光度の下限値を求めるに留まった。

付 録 C ADU $\Leftrightarrow$ mJy 変換値

測光標準星 (BS 7773) の PDI 観測データを用いて、実際検出されたピクセル値 (ADU) が、何 [mJy] に相当するかを求める。

1. BS 7773 のデータ確認をする (画像の中央で撮られていないデータも含まれていた)。
2. HD 169142 と同じように、バイアス除去、規格化 (HD 169142 の解析に用いたフラット画像を使用する)、バッドピクセル除去、歪み補正、垂直成分と水平成分を足して I を作る、器械偏光補正を行う。
3. 1 フレームずつを測光して、その平均をとる。
4. 測定した ADU 値と、BS 7773 の等級を比較する。

測光標準星の等級カタログ

http://www.jach.hawaii.edu/UKIRT/astronomy/calib/phot_cal/ukirt_stds.html

3 の測光は、IRAF のタスク「phot」を用いて行う。基本的に、
http://optik2.mtk.nao.ac.jp/subaru_red/IRCS/files/IRCSimg.pdf
の「5.1 ゼロ等級の見積もり」を見て行った。解析ログは次の通りであった。

```
cl > noao
cl > digiphot
cl > apphot

cl > unlearn centerpars
cl > centerpars.calgori = "centroid"
cl > centerpars.cbox = 90
cl > centerpars.cthresh = 5
cl > centerpars.minsnra = 5
cl > unlearn fitskypars
cl > fitskypars.salgori = "median"
cl > fitskypars.annulus = 270 //星の FWHM の 2.5 倍程度
cl > fitskypars.dannulus = 10
cl > fitskypars.dannulus = 20
cl > unlearn photpars
cl > photpars.aperture = 200 //星の広がりの半径程度 [pix]
cl > unlearn phot
cl > phot.output = "52940_I.dat"
cl > phot.interac = yes
```

```
cl > phot.radplot = yes
cl > phot 52940_I.fits
```

この結果, BS 7773 = 88205425 [ADU/s] であった. また, BD 7773 の H バンド等級は, 4.859 であったので,

$$\begin{aligned}
 F_{total} &= \frac{1}{10^{0.4 \times 4.859}} \times 1050 \times 1000 = 11956.2 [\text{mJy}] \\
 11956.2 [\text{mJy/arcsec}^2] &= 88205425 [\text{ADU/s}] \\
 &= 8820.5 [\text{ADU/s/pix}] \\
 1.35 [\text{mJy/arcsec}^2] &= 1 [\text{ADU/s/pix}]
 \end{aligned}$$

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導、ご協力を賜りました。百瀬宗武先生には、天文学の基礎に始まり、星・惑星系形成の理論、データ解析に関するアドバイスまで、幅広くご指導していただきました。また、本論文を仕上げるにあたり、辛抱強く熱心にご指導していただきました。心より感謝致します。岡本美子先生には、データ解析を行うにあたり、解析ツール IRAF の使用方法や、解析の進め方への有益なアドバイスをいただきました。ありがとうございます。米倉覚則先生には、本論文を書き上げるにあたり、詳細に論文を読んでアドバイスいただきまして、ありがとうございました。

大阪大学の深川美里助教には HiCIAO データ解析方法全般、解析ツールの使用方法、解析方法の助言など、解析結果の解釈いたるまで、本当に幅広いご指導を賜りました。心より感謝致します。

国立天文台の田村元秀准教授、橋本淳研究員には、HiCIAO 装置の仕組みや、解析方法、解析プログラムの提供などをしていただきました。度々会議やメールで解析経過について助言いただきまして、ありがとうございました。

そして、電波・赤外線観測研究室の同期の皆様や、博士過程の秋山さん、後輩、宇宙理論研究室、高エネルギー宇宙物理研究室のみなさまとは、とても有意義な時間をすごさせていただきました。自身が辛いとき、側で支えてくださり、共に努力し合ってきたからこそ、本論文を書き上げることができました。ありがとうございました。

最後に、私の大学院進学に賛成し、いつも支えてくれた家族に、心から感謝致します。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 家正則他,「宇宙の観測 I - 光・赤外天文学」, 日本評論社
- [2] 福井康雄他,「星間物質と星形成」, 日本評論社
- [3] Eugene Hecht,「ヘクト光学 III-現代光学-」, 丸善株式会社
- [4] Eugene Hecht,「ヘクト光学 II-波動光学-」, 丸善株式会社
- [5] George B.Rybicki,「Radiative Processes in Astrophysics」, WILEY-VCH
- [6] 井田茂,「系外惑星」, 東京大学出版会
- [7] A.RAMAN,M.LISANTI,D.J.WILNER,C.Q,and M.HOGERHEIJDE 「A KEPLERIAN DISK AROUND THE HERBIG Ae STAR HD 168142」 2006 , The American Astronomical Society , 131 , 2290
- [8] C.A.Grady 「THE DISK AND ENVIRONMENT OF A YOUNG VERA ANALOG : HD 169142」, 2007, The Astronomical Journal , 665, 1391
- [9] O.pani 「Gas and dust mass in the disc around the Herbig Ae star HD 169142」, 2007, Astronomy and Astrophysics ,491, 219
- [10] http://seeds.mtk.nao.ac.jp/seeds/SEEDS_Project/TOP.html
- [11] http://www.naoj.org/j_index.html
- [12] <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- [13] <http://wwwj.vsop.isas.jaxa.jp/vsop2/science/tbl.gensisei.html>