

HiCIAO を用いた赤外線偏光観測による IM Lup の星周円盤の観測

辰馬 未沙子 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

惑星は前主系列星である T タウリ型星やハービッグ Ae/Be 型星の周りにある原始惑星系円盤から形成される。この惑星形成過程を知るためには星周円盤の観測が必要であり、今まで数多くの円盤が観測されてきた。中でも特に、おおかみ座星形成雲にある M0e 型 T タウリ型星の IM Lup は、過去の観測から典型的な T タウリ型星であるが比較的大きな星周円盤を持つことが知られている。しかし、円盤の大まかな全体像しかなかった。

そこで今回、我々は SEEDS プロジェクトの一環として、すばる望遠鏡 HiCIAO の偏光差分撮像モードを用い、H バンド ($1.6 \mu\text{m}$) で IM Lup の星周円盤の偏光強度 (偏光度 \times 強度) を観測した。中心星やそのスペクトルノイズは無偏光 (偏光度 = 0) なので、今までの観測とは違いこの方法では完全に中心星の影響を取り除くことができ、円盤の中心領域まで見ることができる。その結果、円盤の楕円によるフィッティングや動径方向、方位角方向の輝度分布から、偏光強度が短軸に対して非軸対称であることがわかった。一方、過去の観測による強度の画像からは、このような短軸に対する非軸対称性は見られていない。

この非軸対称性の起源としては二つの可能性が考えられる。一つ目としては強度に時間変動がない場合、偏光度に非軸対称性があるということであり、これは性質の異なるダストが非軸対称に分布していると考えられる。二つ目としては強度に時間変動がある場合、強度に非軸対称性があるということであり、これは非軸対称な内縁円盤による中心星からの光の遮蔽効果による可能性がある。この非軸対称性の起源を探るために、円盤モデルとのフィッティングや追加観測を予定している。

1 Introduction

原始惑星系円盤とは、前主系列星である T タウリ型星やハービッグ Ae/Be 型星の周りにある、ダストとガスで構成される星周円盤のことである。円盤中のダスト質量はガス質量のおよそ 1% ほどしかないが、そのダストが合体成長しながら円盤中心面に沈殿することで km サイズの微惑星が形成され、さらにこの微惑星が合体して原始惑星ができ、そして原始惑星同士が合体したりガスをまとったりして惑星へと成長していく。この惑星形成シナリオの初期条件となる原始惑星系円盤の観測は大変重要であり、すばる望遠鏡の HiCIAO (High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics) を用いた SEEDS (Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru) プロジェクトで数多くの円盤が観測されてきた。

IM Lup はおよそ 190 pc の距離 (Wichmann et al. 1998) のおおかみ座星形成にある M0e 型 (Hughes et

al. 1994) の T タウリ型星であり、比較的大きくて質量の大きい円盤を持つことが知られている (Pinte et al. 2008)。中心星と円盤の物理量を表 1 にまとめる。

また、IM Lup は赤外線の散乱光の観測はされた (Pinte et al. 2008) が、図 1 のようにコロナグラフなどで中心星の影響を取り除いたために円盤の中心領域は見え、大まかな全体像しかなかった。

この論文で、我々はすばる望遠鏡 HiCIAO を用いた IM Lup の星周円盤の赤外線偏光強度の観測結果から、円盤の非対称性について過去の散乱光画像と比較しながら議論する。また、この論文は未公開の画像を含むため、該当する画像は掲載しない。

2 Observations and Data Reduction

UT2014 年 6 月 7 日に SEEDS プロジェクトの一環として、すばる望遠鏡の赤外ナスマス焦点と、補

表 1: IM Lup の物理量。(1) Wichmann et al. 1998 (2) Pinte et al. 2008 (3) Öberg et al. 2011 (4) 2MASS All Sky Catalog of Point Sources

物理量	値	参考文献
距離	190 ± 27 pc	1
恒星質量	$\sim 1 M_{\odot}$	2
年齢	$\sim 10^6$ yr	2
円盤ダスト質量	$\sim 10^{-3} M_{\odot}$	2
円盤外半径	~ 400 AU	2
円盤の傾き	$50^{+3}_{-5}^{\circ}$	2
質量降着率	$\sim 3 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$	3
A_V	0.5 mag	2
H バンド等級	8.089 ± 0.040 mag	4

償光学系 AO188、近赤外高コントラスト撮像カメラ HiCIAO を用いて、H バンド ($1.6 \mu\text{m}$) で IM Lup の円盤が撮像された。観測はコロナグラフを使わない偏光差分撮像モード qPDI (quad Polarization Differential Imaging) を用いて行われた。qPDI では、ダブルウォラストプリズムを用いて入射光を直交する 2 つの偏光成分に分け、さらにそれぞれを 2 つずつに分けることで 1 枚の画像に同時に 4 つの星像を撮像しており、それぞれの視野は $5'' \times 5''$ 、ピクセルスケールは 9.5 mas/pixel である。直線偏光は 2 分の 1 波長板を $0^{\circ}, 22.5^{\circ}, 45^{\circ}, 67.5^{\circ}$ の 4 つの角度で回転させることで得られ、それぞれの積分時間が 20 秒の 84 枚の画像、すなわち 21 サイクルの波長板の回転分、を撮像した。

解析には IRAF の PDI pipeline を用いた。検出器特有のストライプパターンをそれぞれの画像から除去し、フラットフィールドやバッドピクセルの除去を行い、1 枚の画像に 4 つの星像が撮像されているため画像を 4 つに分割した。そして分割された 4 つの画像のゆがみを補正し、それぞれの星の中心の位置を合わせ、同じ偏光方向のものをそれぞれ 2 つずつ足し、作成された 2 つの直交する偏光成分を引くことで、波長板の回転角 $0^{\circ}, 45^{\circ}, 22.5^{\circ}, 67.5^{\circ}$ にそれぞれ対応する、ストークス $+Q, -Q, +U, -U$ の 4 種類の画像をそれぞれ 21 枚ずつ作成した。さらに、ストークス $+Q$ からストークス $-Q$ を引き 2 で割ることで 21 枚のストークス Q と、同様に 21 枚のストークス

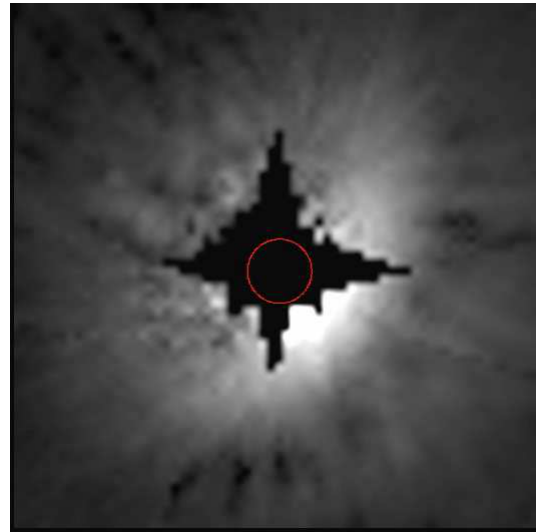


図 1: ハッブル宇宙望遠鏡の NICMOS カメラで撮像された IM Lup の星周円盤の $1.6 \mu\text{m}$ の散乱光画像。コロナグラフを用い、さらに中心星の PSF を引いている。中心の赤い円は半径 $0''.3$ のコロナグラフを示しており、北が上で東が左、平方根スケールで表されており、視野は $5'' \times 5''$ である (Pinte et al. 2008)。

U を作成し、視野回転を補正した後それぞれの中央値をとることで、最終的なストークス Q とストークス U の画像を作成した。ストークス I は同様の操作を全て引き算ではなく足し算で行うことにより求めた。最後に、ストークス Q とストークス U から偏光強度 $PI = \sqrt{Q^2 + U^2}$ を計算した。偏光強度画像の積分時間は 14 分である。

中心星やそのスペckルノイズ、円盤自身の熱放射は無偏光であるのに対し、円盤に反射、散乱した中心星からの光は偏光である。その偏光方向は観測者から見て中心星からの動径方向に対して垂直であり、偏光ベクトルマップを描くと中心星に対して同心円状になるはずであるが、求められた偏光強度画像の偏光ベクトルマップを描くと、画像の左上から右下方向にわずかに整列したベクトルマップとなった。これを補正するために、ストークス I の輝度の動径プロファイルをプロットし、ハローの部分を適当な関数でフィッティングし、ストークス Q やストークス U のスケールと合わせることで人工的な偏光ハローを作成し、元の円盤の偏光強度画像から引いた。

再度偏光ベクトルマップを描くときちんと同心円状になっていることが確認できた。

最後に、HiCIAO の空間分解能の $\text{FWHM} 0''.07$ と合わせるために、ストークス Q とストークス U をガウシアンで畳み込み、最終的な偏光強度画像を得た。

AO188 の性能を評価するために、同様の解析を PSF (Point Spread Function) 参照星 HD141426 に対しても行ったところ、HD141426 は円盤を持たないにも関わらず中心から半径 $0''.5$ 以内に信号が見られたため、IM Lup の PI 画像に対しても半径 $0''.5$ 以内はノイズと見なし、マスクをかけた。

3 Results

得られた偏光強度画像は、図 1 と同様に北西から南東にかけて細長い楕円の形をしているが、南西部分が最も明るい図 1 とは異なり、北西部分が最も明るい。しかしこれは散乱光の強度画像と偏光強度画像の違いを表しており、ダストによるレイリー散乱での前方散乱や後方散乱は無偏光になるので、円盤の短軸方向の偏光強度は弱くなることを示している。

円盤を 15 mJy/arcsec^2 から 135 mJy/arcsec^2 まで、 15 mJy/arcsec^2 の間隔で等高線を描き、背景と円盤との境目 (15 mJy/arcsec^2) を、楕円の中心や位置角、長軸と短軸の長さを変数として最小二乗法を用いてフィッティングをすると、長軸に対する位置角 (P.A.) は -36° 、長軸と短軸の長さがそれぞれ $4''.7$ 、 $2''.4$ となり、距離を 190 pc とすると長軸の長さはおよそ 900 AU となる。楕円の中心と中心星の中心とのずれは長軸方向に $0''.07$ 、短軸方向に $0''.18$ となり、空間分解能が $0''.07$ なので長軸方向のずれは $\sim 1\sigma$ なのでわずかにリアル、短軸方向は $\sim 3\sigma$ なのでリアルと言うことができるが、長軸方向には幾何学的には説明できず、短軸方向にはフレアした円盤として説明できる。また、円盤を平らな円と仮定したときの円盤の傾きも求めると 60° となり、 50^{+30}_{-5} (Pinte et al. 2008) とは異なる値となったが、これも強度画像と偏光強度画像の違いを表していると考えられる。

円盤は南東方向よりも北西方向のほうが明るく見える、すなわち短軸に対して非軸対称に見えるが、それを定量的に確認するために円盤の北西側と南東

側に関して、長軸方向の P.A. = $-36^\circ, 144^\circ$ と、長軸方向から前方の短軸側 (南西) に 45° の位置の P.A. = $-81^\circ, 189^\circ$ 、長軸方向から後方の短軸側 (北東) に 45° の位置の P.A. = $9^\circ, 99^\circ$ について、動径方向の輝度分布をプロットした。それぞれの位置角の線上について $0''.1$ 毎の平均を計算し、誤差は標準偏差とした。すると、P.A. = $-81^\circ, 189^\circ$ に関しては全体的に一致しているが、P.A. = $-36^\circ, 144^\circ$ に関しては $0''.9$ の半径付近で ~ 2 倍の最大の違いが見られ、P.A. = $9^\circ, 99^\circ$ に対しても $0''.4$ の半径付近で ~ 2 倍の最大の違いが見られた。また、フィッティングした楕円の中心と位置角を用いて、長軸の長さを $3''.4$ 、短軸の長さを $1''.7$ とした楕円上の方位角方向の輝度分布もプロットした。方位角が 0° の方向を前方の短軸側とし、誤差は標準偏差として 10° 毎の平均を 180° まで計算した。すると、 20° の方位角付近で円盤の北西側と南東側に ~ 2 倍の最大の違いが見られた。これらは円盤が短軸に対して非軸対称であることを示している。

4 Discussion

今回の観測波長と同じ波長 $1.604 \mu\text{m}$ でハッブル宇宙望遠鏡の NICMOS カメラを用いて 2005 年 7 月 11 日に撮像された強度画像 (図 1) や、波長は異なるが $0.606 \mu\text{m}$ と $0.814 \mu\text{m}$ で同じくハッブル宇宙望遠鏡の WFPC2 カメラを用いて 1999 年 2 月 18 日に撮像された強度画像 (Pinte et al. 2008) では、中心星近傍までは見えていなかったが円盤の北西側と南東側に非軸対称性は見られなかった。

偏光差分撮像法を用いることで理論的には中心星の影響を完全に取り除くことができるが、補償光学が不完全であるために中心から半径 $0''.5$ の領域でノイズが卓越している。距離を 190 pc とするとこれは半径 95 AU に相当するため、より内側の領域を観測するにはさらに性能の良い補償光学を用いた観測が必要となる。しかし、これを考慮しても過去のコロナグラフを用いた強度の観測よりは内側の領域までを観測できており、円盤の北西側と南東側の非軸対称性を議論できるほどの信号雑音比も達成できているため、偏光差分撮像法は星周円盤の観測には強力な方法であることがわかる。

円盤の強度画像 (2005 年) では短軸に対する非軸対称性が見られていなかったのに対し、偏光強度画像 (2014 年) では最大で ~ 2 倍の非軸対称性が見られた。この非軸対称性の起源として 2 つの可能性が考えられる。

1. 強度に時間変動がない場合。偏光強度 PI は偏光度 P に強度 I をかけたものであるため、強度が軸対称であれば偏光度が短軸に対して非軸対称であると言える。これはダストの分布や性質に非軸対称性があることが原因として考えられる。
2. 強度に時間変動がある場合。強度に時間変動があるということは短軸に対して非軸対称ということであり、偏光強度の非軸対称性は偏光度ではなく強度に起因していると考えられる。数年の間に円盤外側の強度画像が変化するという事は、これは円盤の構造自体に非軸対称性があるのではなく、中心星近傍の非軸対称な内縁円盤による中心星からの光の遮蔽効果の可能性がある。ダストの昇華温度などから典型的な円盤内縁半径は ~0.1 AU であり、ケプラー速度から公転周期は ~ 10 日となるので、強度の時間変動を確認するには 2 週間程度の短期間のモニター観測が必要となる。

この 2 つの可能性に制限をかけるために、2015 年 8 月 5 日から 18 日の 2 週間、南アフリカ天文台サザランド観測所にある IRSF1.4m 望遠鏡を用いてモニター観測を行う。もし強度に時間変動があれば、0.1 から 1 等級ほどの変光が期待される。

5 Conclusions

私たちは T タウリ型星である IM Lup の星周円盤の散乱光の偏光強度を H バンドで観測した。0".07 の高分解能であるが、補償光学が不完全なため中心星近傍の半径 0".5 以内の構造は解明できなかった。

円盤は位置角が -36° で長軸の長さが短軸の長さの 2 倍の楕円の形をしており、 60° の傾きを持つことがわかる。また中心星の位置に対する楕円の中心のずれより、円盤がフレアしていることがわかる。さらに、円盤の短軸に対して北西側と南東側で最大 2

倍の偏光強度の違いが見られ、この円盤の偏光強度は非軸対称であることを示している。

この非軸対称の起源として 2 つの可能性が考えられる。1 つ目は強度に時間変動がない場合、すなわち強度が軸対称である場合であり、このとき偏光度が非軸対称であると言えるため、ダストの分布や性質に非軸対称性があると考えられる。2 つ目は強度に時間変動がある場合、すなわち強度も非軸対称である場合であり、これは非軸対称な内縁円盤による中心星からの光の遮蔽効果として考えられるため、2 週間程度の短期間のモニター観測が必要となる。そこで 2 週間のモニター観測を IRSF1.4m 望遠鏡を用いて行い、円盤の偏光強度の非軸対称性の起源に対して制限をかける。

Acknowledgements

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

References

- C. Pinte, D. L. Padgett, F. Ménard, et al. 2008, *A&A*, 489, 633
- R. Wichmann, U. Bastian, J. Krautter, I. Jankovics & S. M. Rucinski 1998, *MNRAS*, 301, L39
- J. Hughes, P. Hartigan, J. Krautter & J. Kelemen 1994, *AJ*, 108, 1071
- K. I. Öberg, C. Qi, J. K. J. Fogel, et al. 2011, *ApJ*, 734, 98