

# DIRECT IMAGING OF STRUCTURES IN GIANT PLANET-FORMING REGIONS OF THE PROTOPLANETARY DISK AROUND AB AURIGAE のレビュー

藤井 淳

平成 23 年 8 月 10 日

## Motivation

私がどのようなモチベーションで今回初めて夏の学校に参加し、ポスター発表に臨んだのかということを発表原稿をまとめるに当たって、少し蛇足ではあるかもしれないが述べておきたいと思う。

実のところ、私は系外惑星の観測研究というテーマの大枠は決まっているものの、観測天体は何にするかなどの細かなテーマの設定には至っていない。未だにテーマが決定していない原因としては、系外惑星観測に対する知識の浅さのせいではないかと私は考える。そのため、今回の夏の学校に向けて系外惑星観測の論文を読み、発表することで、テーマの決定に不可欠な系外惑星の観測への理解を深めようと考えた。

また、私の所属する研究室の山田亨先生は SEEDS プロジェクトに参加しているため、私自身の研究も SEEDS での観測に根ざしたものになると思われる。そのため、今回 SEEDS プロジェクトの指揮の下で行われた原始惑星系円盤観測の論文のレビューを発表した。ちなみに、SEEDS は Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with HiCIAO/AO188 の略称で、国立天文台すばる望遠鏡に搭載された高コントラスト撮像装置 HiCIAO、補償光学装置 AO188 を用いて系外惑星と原始惑星系円盤の探査を行うため、日本を中心とした国際共同プロジェクトである。

次のページから今回ポスター発表した論文についての内容に移る。

# 1 INTRODUCTION

星周円盤の構造は惑星形成と密接に関係しているということが、今日の通説である。まだいくつかの問題はあるものの、小さな軌道長半径を持つような過去に発見されてきた太陽系外の巨大惑星 (e.g. Hot Jupiter) は、原始惑星系円盤中のダストにガスが降着してできると考えられている (コア降着モデル)。しかし、近年はこれまで惑星が形成されると考えられてきた領域の外 ( $r > 20AU$ ) にも惑星や伴星が発見されてきており、このような惑星は上述した標準的なコア降着モデルでは説明できないため、惑星間の散乱による惑星の軌道移動や円盤中の重力不安定 (GI) の可能性も考慮した惑星形成理論の重要性も増しつつあるのが現状である。

このように多様な系外惑星形成の理論を確かめるためには、惑星形成中の原始惑星系円盤の inner region ( $r < 50AU$ ) での高精度観測から得られる円盤の構造や物理的状態の詳細な情報が必要不可欠である。

今回の観測天体は、**ハービッグ Ae 型星 AB Aurigae** である。以下に、主要な物理量まとめる。

AB Aurigae の物理量	
太陽からの距離	$144^{+23}_{-17}pc$
質量	$2.4 \pm 0.2M_{\odot}$
年齢	$4 \pm 1Myr$
スペクトル型	A0 Ve

過去の観測から、AB Aurigae は以下のような特徴的な星周構造を持つことが知られている。

- 巨大なガスのエンベロープ ( $r > 1000AU$ ) + コンパクトな円盤 ( $M \approx 20M_{Jup}, r \approx 450AU$ )
- 円盤の outer region ( $r \geq 200AU$ ) における spiral structure
- Polarization Images (PI) における “dip” の中に発見された点光源

このように過去の AB Aurigae の観測では多様な星周構造が観測されているが、空間分解能などの望遠鏡の性能により円盤の inner region ( $r < 50AU$ ) の微細構造は明らかになっていない。

## 2 OBSERVATIONS AND DATA REDUCTION

### 2.1 OBSERVATION

今回の観測は、世界時 2009 年 10 月 31 日に SEEDS プロジェクトの下ですばる 8.2m 望遠鏡を用いて行われた。

以下に、今回の観測で使用した**高コントラスト撮像装置 HiCIAO**の性能や観測モードをまとめる。

高コントラスト撮像装置 HiCIAO の性能	
観測モード	PDI(Polarization Differential Imaging) mode
視野	10"×20" ( <i>o</i> -ray と <i>e</i> -ray の Dual-channel)
ピクセルスケール	9.3 mas/pixel
使用フィルター	H-band(1.6 $\mu$ m)
コロナグラフ	Lyot type(直径 0.3" のマスク)

HiCIAOに加え、**補償光学装置 AO188**を用いる事で、今回の観測で安定な星の PSF の FWHM が 0.06" になるような回折限界を実現した。

次に、今回使用した観測モードである PDI モードについて少し詳しく説明する。

まず、この観測法のメリットは、主星から私たちに直接届く明るい光や主星の PSF における speckle halo などの無偏光の光を効果的に除去し、主星からの光が星周円盤中に含まれるダストにより散乱される事で生じる直線偏光した光だけを観測できる事である。この散乱光を観測する事で、私たちは星周円盤中に含まれるダストなどの散乱に寄与した物質の幾何学的な構造を観測する事ができる。

PDI モードは **Differential Polarimetry** という方法で偏光された光だけを取り出している。以下に、Differential Polarimetry の手順についてまとめる。

1. まず、天体から来る光はある角度に設定された半波長板(直交する偏光成分の片方に位相差を与える事で、偏光角を調節する光学素子)を通過する。この時、偏光された光は半波長板の角度に対応する方向に偏光方向を調節される。この半波長板の角度により、後になって得られるストークスパラメータ  $Q, U$  が決まる(波長板の角度  $\theta = 0$

$0^\circ, 45^\circ$  の時、 $Q$  の画像ができ、 $\theta = 22.5^\circ, 67.5^\circ$  の時、 $U$  の画像ができる)。一方、無偏光の光は直交する成分同士で位相差は与えられるものの正味として通過する前と変わらない状態で半波長板を通過する。

- 次に Wollaston prism を通過する事で、偏光された光はそれぞれ強度が異なる直交する2つの直線偏光成分同士に分離される。この時、無偏光の光は全方向で強度が同じであるので、強度が等しい直交する2つの直線偏光成分として分離される。
- 分離された2つの直交する直線偏光成分は、それぞれ  $o$ -ray と  $e$ -ray の2つのチャンネルに画像として出力される。
- この2つの画像同士を引き算する事で、それぞれチャンネルで強度が等しい無偏光の光からの直線偏光成分が除去され、強度が異なる偏光された光からの直線偏光成分だけが残ったストークスパラメータ  $Q$  または  $U$  の画像が出来上がる。
- しかし、この処理だけだと Wollaston prism を通過する時に生じる直線偏光成分間での経路差、画像の引き算の際の位置合わせによるずれなどで無偏光の光がまだわずかに残る。
- そこで、先に出力された直線偏光成分が  $o$ -ray と  $e$ -ray で逆になるように、半波長板の角度を調節する。上と同じ手順で同じ残差を持つストークスパラメータの画像を作る。
- 最終的に4と6で出来た画像を引き算する事で、残差の消えたストークスパラメータ  $Q$  または  $U$  の画像を得る。

このようにして出来たストークスパラメータ  $Q, U$  の画像から  $\sqrt{Q^2 + U^2}$  となる Polarization Image(PI) 画像を得、この PI 画像から明らかになる AB Aurigae の星周円盤構造について議論していく。

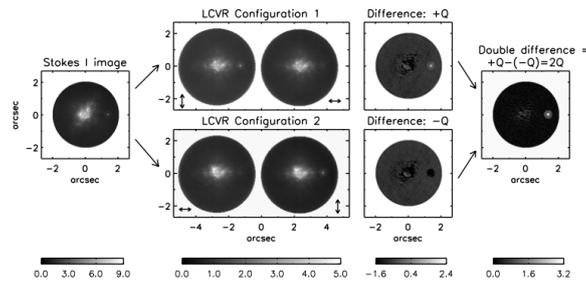


図 1: Differential Polarimetry の概念図 (Hinkley et al.2009)

## 2.2 DATA REDUCTION

基本的には IRAF を用いて、一次処理として Flat-fielding と Dark 画像の引き算を行っている。

また、PI 画像に対する polarization vector pattern を見る事で PI 画像において artificial suture が含まれているかどうかの確認も行っている。

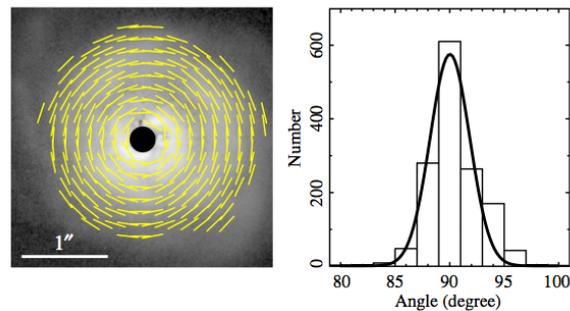


図 2: 左: polarization vector pattern 右: polarization vectors と mask center から vector position までの line との間の角度のヒストグラム

図 2 の左図に今回得られた PI 画像における polarization vector pattern を表されている。polarization vectors に artificial なノイズや中心星からの residual speckle が含まれている場合、vector pattern はランダム又は、平行な配列になるはずであるのである。しかし、上図においては mask で隠れた中心星に対し polarization vectors は中心対称である。従って、今回得られた PI 画像に含まれるノイズはかなり低く、この PI 画像で見られる円盤の特徴的な構造はリアルな構造を反映していると言えるだろう。

### 3 RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 RESULTS

今回の観測で、AB Aurigae の半径方向 22AU-554AU(0.15''-3.85'') をカバーする PI 画像が得られた。今回の観測の目的は、AB Aurigae の星周円盤の inner region( $r < 50AU$ ) の観測であるが、先行研究との比較のため outer region( $r > 140AU$ ) についても少し触れておく。

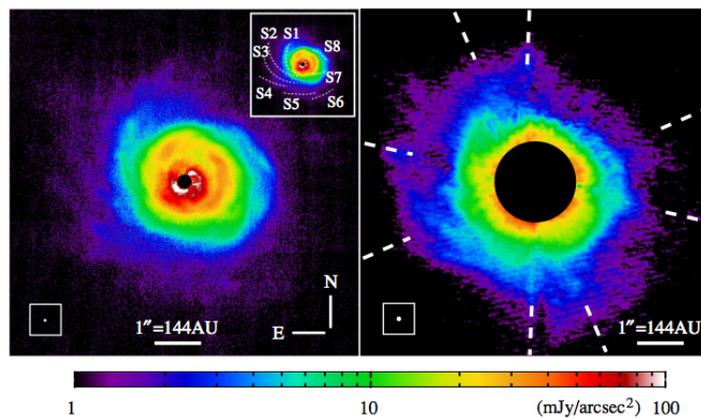


図 3: 左: 今回の観測による AB Aurigae の PI 画像 右: Fukagawa et al. 2004 における AB Aurigae の全強度画像 (I 画像)

図 3 を見てみると、それぞれの図の左下のボックスの中で表されている空間分解能よりも大きいスケールでの構造の一致が見られる。今回観測において用いられたフィルターは近赤外線バンドであり、円盤は近赤外線に対し光学的に厚いため、図 3 の左図で見られる構造は円盤表面に存在するダストによる中心星からの光の散乱光をトレースしている。また、これらの図で特徴的な spiral structures も見られる。この spiral structures は光学的に薄いサブミリ波連続光の先行観測においても見られる特徴であるので、円盤表面から円盤赤道面にまで及ぶ構造である事が伺える。

ここからは、今回の観測された AB Aurigae の円盤の inner region( $r < 50AU$ ) の特徴的な構造について議論を進めていく。図 4 に円盤の inner region の PI 画像を示す。

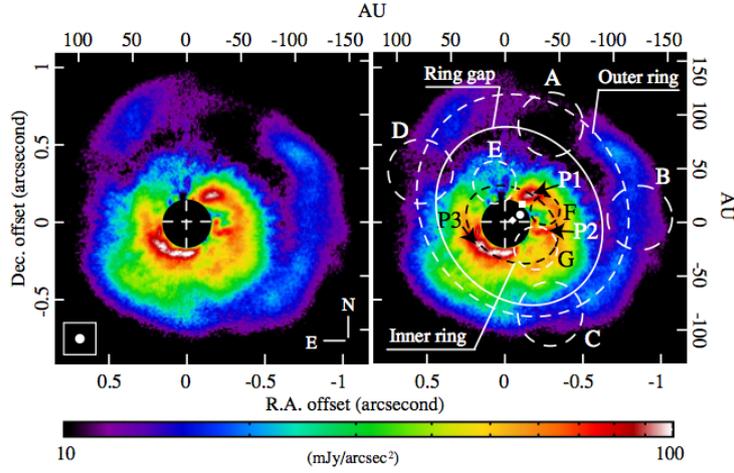


図 4: AB Aurigae disk の inner region

1) *two ellipse rings(outer ring and inner ring)*

図 4 において白い破線の楕円が outer ring、黒い破線の楕円が inner ring を表している。この楕円のようなリングはこの観測で初めて観測された構造である。以下に、これらの楕円形のリングに対する楕円フィットの結果を示す。

表 1: 円盤構造における楕円フィットの結果  
Results of an Ellipse Fit<sup>a</sup> of the Disk Around AB Aurigae

Parameter	Outer Ring	Ring Gap	Inner Ring
Diameter of the major axis (AU)	$210.8 \pm 2.5$	$170.2 \pm 2.0$	$92.0 \pm 6.8$
Diameter of the minor axis (AU)	$188.1 \pm 2.2$	$149.1 \pm 1.7$	$67.2 \pm 4.2$
Position angle of the major axis (°)	$36.6 \pm 6.6$	$36.2 \pm 5.2$	$64.6 \pm 8.9$
Inclination <sup>b</sup> (°)	$26.8 \pm 1.9$	$28.8 \pm 1.7$	$43.1 \pm 6.8$
Geometric center <sup>c</sup> (mas:mas)	$(121 \pm 7; 127 \pm 8)$	$(92 \pm 4; 40 \pm 7)$	$(54 \pm 17; 4 \pm 13)$
Width <sup>d</sup> (AU)	$29.8 \pm 1.3$	$16.1 \pm 1.6$	$32.1 \pm 2.5$

表 1 において注目すべき点は、リング間の inclination の違いである。outer ring に比べ inner ring の方が傾いている事がわかる。これは何らかの影響により inner ring が歪められている事を示唆すると考えられるのだが、詳しくは Discussion で考察する。

2) *ellipse ring gap*

図 4 において白い線の楕円で示されている。このギャップは先行研究 (Openheimer et al.2008; Perrin et al.2009) でも微かにではあるが確認されている。表 1 に楕円フィットの結果が示されている。このギャップの外側の端の位置 ( $\approx 85AU$ ) と、AB Aurigae の中間赤外線の研究 (Honda et al.2010) で観測された構造を説明するために考えられる表面密度が減

少する境界半径  $R_c = 88AU$  の wall structure との一致は興味深い一致であるように思われる。

### 3) *Seven dips and Three peaks*

図4において、破線の手で囲まれた部分が dip で *dip.A* ~ *dip.F* と表され、矢印で示された部分が peak で *P1* ~ *P3* と表されている。dip と peak はリング上に現れているので、outer ring と inner ring の表面輝度の平均方位角プロファイルを図5に示す。

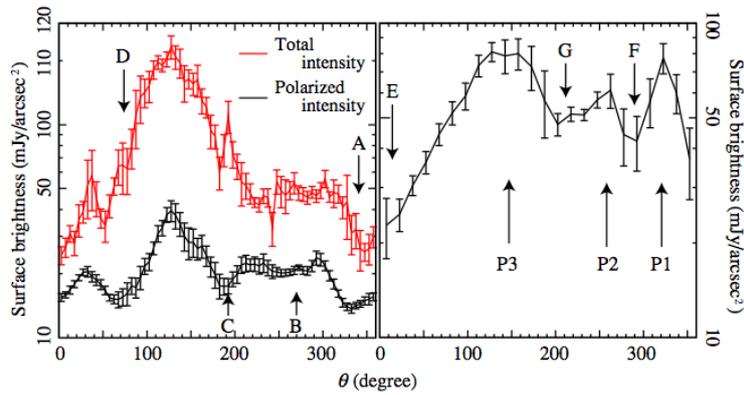


図5: 左: outer ring の方位角プロファイル 右: inner ring の方位角プロファイル

図5において、黒い線はPI画像上での方位角プロファイル、赤い線はI画像上での方位角プロファイルを表す。先行研究のPI画像 (Oppenheimer et al.2008; Perrin et al.2009) でも *dip.A* と同じ位置に dip が確認されている。図5からわかるように、今回のI画像でも *dip.A* は  $3\sigma$  で確認されている。この事は、PI画像はI画像のパターンもトレースし、PI画像において必ずしも円盤中のダストによる幾何学的な偏光の効果だけを見ていく訳ではないと言う事が示唆される。また、今回観測された peak はいずれも広がった構造であるため、点光源であるとは考えにくい。

### 4) *Point source in dip.A*

Introduction で特徴的な構造として述べたような先行研究 (Oppenheimer et al.2008) において確認された点光源は、今回観測されなかった。この結果は、先行研究である Perrin et al.2009 の結果と一致する。

## 3.2 DISCUSSION

今回観測された AB Aurigae の円盤の非軸対称構造を説明するために、以下の3つの解釈を考えてみる。

### 1) *Gravitational Instability (GI)*

円盤の重力的な安定性を Toomre's  $Q$ -parameter で表せる。

$$Q = \frac{c_s \kappa}{\pi G \Sigma} \quad (1)$$

ここで、 $c_s, \kappa, \Sigma$  は、それぞれ音速, 周転円周波数, 表面密度である。この  $Q$  の値が1以下の時、円盤は重力的に不安定な状態となり、円盤中でGIが生じる。この  $Q$  の値を求めるため、*Piètu et al. 2005* のサブミリ波観測から推定される円盤の物理量を用いる。その結果は、 $r \sim 100AU$  で  $Q \approx 11$  となり、重力的に安定でGIは生じないと推定される。

しかし、地上からのサブミリ波観測は大気の影響を受けやすい。また、円盤中のダスト粒子の光学的特性の大きい不定性もあるため、サブミリ観測からの円盤質量の推定にも大きな不定性が含まれると考えられる。従って、まだ円盤中でGIが生じないと決めつけるのは時期尚早であると思われる。

### 2) *Planetary Perturbation*

円盤中に惑星が存在すると、惑星の回転と共回転する渦状の密度波が励起される。その結果として、円盤全体に重力的な摂動が広がっていくと考えられている。この惑星の存在による摂動によって、今回観測された構造はある程度説明がつく。まず、inner ring の傾斜角の大きさから見られる歪みは、inner ring 付近に惑星が存在する場合にその重力的な摂動によるものと解釈できる。次に、リングギャップと *dip.A* も *dip.A* 付近に大体  $1M_J$  程度の質量を持つ惑星が存在すればギャップを形成できると考えられる。また、その他の小さい *dip* や *peak* も惑星からの小さい摂動として説明できるかもしれない。今回の近赤外線観測では円盤の表面しか見る事が出来ないため、もし円盤の赤道面付近に埋め込まれた惑星がある場合、今回の観測で惑星が確認されないという事実にも頷ける。

しかし、AB Aurigae の円盤に惑星が既に存在していると考えると、その惑星の年齢は AB Aurigae の年齢から考えてたったの 3-5Myr である事になる。この年齢はコア降着シナリオで考えられる惑星形成に必要なタイムスケールの約 10Myr よりも短い。この事からも惑星形成理論を一元的に決めるのが難しいと言う事が暗示される。

### 3) *Magneto-Rotational Instability (MRI)*

円盤中のMRIによっても今回観測される構造は説明できるかもしれない。なぜなら、MRIの数値シミュレーションから円盤全体に摂動が広がるといふ事が示されており、またMRIによって円盤表面で有意に摂動を引き起こす disk wind が促進されるという事も示されているからである。

## 4 Summary

今回紹介させていただいた論文を勝手ながら以下のように要約した。

- AB Aurigae を中心に半径方向 22AU-554AU(0.15''-3.85'') の範囲をすばる望遠鏡の HiCIAO を用いて H-band differential polarimetry を行い、AB Aurigae の円盤構造の PI 画像を撮像した。
- 今回観測された PI 画像で見られる double ring(inner ring と outer ring), ring gap 等といった円盤の非軸対称構造の原因は、円盤赤道面付近に埋め込まれた惑星の存在による摂動が有力であるが、GI や MRI の可能性もまだ否定できない。
- 今後、この非軸対称構造の時間変動の観測が必要であると考えられる。これにより、活動的な円盤内の物理プロセスや Introduction でも述べた広い軌道長半径を持つ惑星や伴星の形成メカニズムへの理解が深まるだろう。

## 5 REFERENCES

- HASHIMOTO, J., ET AL. 2011,Apj,729L,17H
- FUKAGAWA, M., ET AL. 2004,Apj,605,L53
- HINKLEY, S., ET AL. 2009,Apj,701,804
- HONDA, M., ET AL. 2010,Apj,718,L199
- OPPENHEIMER, B. R., ET AL. 2008,Apj,679,1574
- PERRIN, M. D., SCHNEIDER, G., DUCHENE, G., PINTE, C., GRADY, C. A., WISNIEWSKI, J. P., & HINES, D. C. 2009,Apj,707,L132

- *PIÈTU*, V., GUILLOTEAU, S., & DUTREY, A. 2005, *A&A*, 443, 945