# ALMAによる原始惑星系円盤観測の進展と 惑星形成過程への示唆

# 片岡章雅 (国立天文台)









# 惑星形成: 何を解き明かしたいか



# ~ 1 km

## ~ 1000 km









# • 第一部: ALMAを中心とした、原始惑星系円盤の描像のレビュー(~20分)

## ● 高分解能で見えたリング・ギャップ等副構造

## サーベイ観測で明らかとなった全体像

# 第二部: 我々の進めてきたALMA偏光観測(~25分)

## ダスト散乱による偏光と、ダストミクロ物理への制限

● (時間があれば、今進めているダスト組成への示唆の研究~10分)

本日のお話



Akimasa Kataoka (NAOJ)

- cf. 1 秒角 = 140 au

- 各星形成領域に、100-300くらい円盤がある

Planck XX, 2015, Cieza et al. 2019



Wyatt et al. 2008; Hernandez et al. 2007

# 天体としての原始惑星系円盤

- 各星団の年齢はHR図で出す。
- 赤外線超過から、「星が円盤を保持する割合」が わかる
  - 例えば、年齢2-300万年の若いTaurusは6割くら いの星が円盤を持っている。
  - 年齢500万年くらいの老いたUpperScoは、2割 くらいの星しか円盤を持っていない
- ただし、円盤ダストの質量はわからなかった。







## 1天体に数時間費やす



- (total flux) = 1.4 Jy at 1.0 mm
- $(rms) = 12 \mu Jy/beam$
- (spatial resolution) =25ミリ秒角 (3.5 AU)



# ALMAで見えた2本の「うで」

観測された原始惑星系円盤 Elias 2-24



Perez et al. 2016

### 磁気流体シミュレーション



Tomida et al. 2017

# ALMAで見えた「偏った円盤」



van der Marel et al. 2013



想像図 (van der Marel et al. 2013)

# ALMAで見えた「リング円盤」



Fedele et al. 2018

## ・アルマ以前は「円盤状のものがありそう」と思われていただけだったが...



・リング・ギャップ構造→惑星がギャップの中にいる?

360

# アルマで見た原始惑星系円盤





## 1天体に数時間費やす



- (total flux) = 1.4 Jy at 1.0 mm
- (rms) =  $12 \mu Jy/beam$
- (spatial resolution) =25ミリ秒角 (3.5 AU)







Andrews et al. 2013, Ansdell et al. 2016, Barenfeld et al. 2016

# 天体としての原始惑星系円盤

- 領域の違い
  - Lupus, Taurus: 200-300万年(若い) ullet
  - Upper Sco: 500-1000 万年 (老いている)
- Class II円盤のミリ波強度を測った。  $\bullet$
- 結果 lacksquare
  - ・若い領域の円盤のほうが3倍くらい明るい。
  - 明るい円盤は、おそらく円盤の質量が多い







領域の違い

- Ophiucus, Taurus, Lupus, Chal: 1-3 Mega year (若い)
- Upper Sco: 5-11 Mega year (老い ている)
- 結果
  - 結構明るい天体は、サイズが~30-100auくらいある。
  - 明るい天体の大きさは、UScoのほ うがちょっと小さいかな。



Hendler et al. 2020



- 原始惑星系円盤
  - ・距離100-150pcの場所に、円盤を~100個持つ領域が~10個ある。
  - ミリ波連続波でダスト円盤が観測できる
- ダスト円盤の質量 (Class II)
  - ・ 質量中央値は5-15地球質量。分散大きい(0.1-100地球質量)
- ダスト円盤の大きさ (Class II)
  - ・明るい天体の半径は30-100auくらい(でも分解能も~30au程度の情報)
  - まだ暗い天体の大きさはわからない。







Hendler et al. 2020







# • 第一部: ALMAを中心とした、原始惑星系円盤の描像のレビュー(~20分)

## ● 高分解能で見えたリング・ギャップ等副構造

## サーベイ観測で明らかとなった全体像

# 第二部: 我々の進めてきたALMA偏光観測(~25分)

## ダスト散乱による偏光と、ダストミクロ物理への制限

● (時間があれば、今進めているダスト組成への示唆の研究~10分)

本日のお話

# ALMA偏光観測は、明るい天体のみ



Kataoka et al. 2016

- ・ダスト連続波の偏光を観測する
- 偏光度は0.1-10%程度 •
  - →普通の連続波の1/100の暗い信号 を受信する必要がある
- ・ あんまり高くない分解能(0.5秒角 ~50auくらい)でたくさん積分(~数時 間)しないと取れない



# ALMA偏光観測



Ohashi et al. 2018, Sadavoy et al. 2019...









# ALMA 偏光の







複合的





Bacciotti et al. 2018, Mori et al. 2019...





- ・星・惑星形成領域において、ミリ 波帯では、~10-100K程度の熱放 射が見える。
- 熱放射を偏光させる**有力なメカニ** • ズムは、ダストの整列



星・惑星形成におけるミリ波偏光

### ダスト整列による偏光理論

偏光観測の例

Girart et al. 2006



- もし空間分解能が上がれば、原 始惑星系円盤の偏光が見えるは ず
  - ・原始惑星系円盤全体の大きさ は100 au くらい~1秒角くら し
- 磁場に整列していれば、トロイ ダル磁場の証明ができるはず だ。





e.g., Draine and Weingartner 1997, Lazarian 2007, Cho and Lazarian 2007...

原始惑星系円盤におけるミリ波偏光

円盤偏光予測

ALMA偏光観測



Kataoka et al. 2017, Dent et al. 2019...



### 

### The observer is you.

(the line of sight is perpendicular to the plane of this slide)

# ダスト偏光によるミリ波偏光

thermal dust emission of other dust grains

a dust grain

**Horizontal Polarization** 

# ダスト偏光によるミリ波偏光























### 偏光ベクトルはチューブ構造 に対して垂直

真横から見た円盤

傾いた円盤











# 輻射輸送計算結果

P[%] 3.00 2 2.50 2.00 1.50 1.00 0.50 0.00 -2 2 0 [arcsec] P [%]

## 偏光ベクトル

# 内側動径方向、 外側回転方向

Kataoka, et al., 2015, Ohashi et al. 2020,...

3.0 2.5 2.0 1.5 0 1.00.5 0.0 0 0.4 0.8 -0.8 -0.4 [arcsec]

## 短軸と平行

Kataoka, et al., 2016a, Yang et al. 2016, Dent et al. 2019, Okuzumi and Tazaki 2019, Ohashi and Kataoka 2019, Lin et al. 2020, Brunngräber and Wolf 2020 ...

Akimasa Kataoka (NAOJ)

Assumption: spherical dust grains



散乱偏光は、(ダスト半径)=2π×(波長)くらいのときだけ検出できる

散乱偏光で可能となったサイエンス





ALMA偏光観測を利用したダストサイズ測定

• 例

- ・ ALMA Band 7 (0.87mm)で散 乱偏光が受かったけど、 ALMA Band 3 (3.1 mm)では散 乱偏光が受からなかった
- →ダストサイズは~150 µmく らい

Kataoka et al., 2015

### ◊ ∅ ∏ D $\Diamond$ $\Box$ $\Box$ 000000 $\Diamond \square \square$ HL Tau のALMA偏光観測



ALMA Partnership 2015, Stephens et al. 2017





### 散乱が卓越 at 0.87 mm



Kataoka et al. 2017, modified



スペクトルからのダストサイズ推定 SED Optically thick, transition to Wien's law  $\lambda F_{\lambda}$ センチ波 赤外 λ ~ミリ波

Optically thick, Rayleigh-Jeans law ( $\alpha = 2$ )





Tazzari et al. 2020a

See: Beckwith and Sargent 1991, Isella et al. 2007 ...





Kataoka et al. 2017

## **偏光観測は~100µmを示唆**

0.9-3mmのスペクトルが取れたもの:HL Tau, DG Tau

0.9mmの偏光検出 ~10-20天体

ダストサイズの不一致



Tazzari et al. 2021

### スペクトル観測は~1mm-1cmを示唆

各領域の明るい数十天体

# 仮定が間違っている?

### 吸収係数;空隙あっても情報が縮退



Kataoka et al. 2014

 $\bullet$ 

**偏光強さ;赤がコンパクト、青緑が空隙あり** 

Tazaki et al. 2019

## 吸収・散乱係数の情報があるとサイズと空隙が区別可能





### ギュッと詰まってはいなさそう...

## だけどそんなにスカスカじゃなさそう

# 空隙率もわかりそう



# まあまあ詰まっている! でも結構小さい!!(100ミクロン)



- ALMAで、原始惑星系円盤の ・明るい円盤は、ミリ波偏光も 取れる 全体像がわかってきた。
- 非検出円盤に注意







Akimasa Kataoka (NAOJ)

# まとめ

- ・偏光から、ダストサイズ、 空隙もわかる
- ・ミリ波の吸収・散乱効率が 議論できるようになった



Kataoka et al. 2016





