

卒業論文

ALMA 望遠鏡による観測に基づく HL Tauri ダスト円盤の構造解析

2023 年度

(令和 5 年度)

茨城大学 理学部 理学科 学際理学コース
20S6033H

平康あかり

概要

本研究の目的は、原始惑星系円盤の一つである HL Tauri に付随する星周円盤の構造を探ることである。

ALMA 望遠鏡で異なる周波数 Band7、Band6、Band3 で円盤を観測したデータを用い、データのビームサイズとピクセル数を揃え構造解析を行った。

解析のため、方位角方向で平均した輝度から作成した楕円を元データから引いたものを残差とし、残差の平均輝度楕円に対する割合を求めた。

残差から、周波数による精度の違いや HL Tauri の構造を理解することができた。

目次

第 1 章	研究背景・目的	4
第 2 章	観測データ	6
第 3 章	解析方法	9
第 4 章	結果	10
第 5 章	考察	17
	謝辞	18
	参考文献	19
	付録	20

第1章 研究背景・目的

星間雲のなかで密度が高く、水素が解離せず水素分子として存在している領域を分子雲と呼び、分子雲中でさらに密度の濃い部分を分子雲コアと呼ぶ。分子雲コアが自己重力により収縮することで星が生成される。その際により大きな角運動量を持ったガスは直接中心には到達できず、形成されつつある星の周りに円盤が形成される。これを原始惑星系円盤と呼び、この中で惑星が形成されたと考えられる。原始惑星系円盤は前主系列星 HL Tau に付随する星周円盤である[1]。

原始惑星系円盤の一つである HL Tau は、高角度分解能のミリ波連続波画像によって、複数のリングとギャップを持つ円盤が発見された最初の天体の一つである。HL Tau の地球からの距離は約 140pc で、円盤長軸位置角は $PA=138.02^\circ$ 、傾斜角 $i=46.72^\circ$ である[2]。

本研究では、ALMA 望遠鏡で観測された 3 つの異なる周波数のダスト連続波の輝度分布から方位角方向で平均した動径分布画像との残差を求め、ダスト円盤の構造を探ることを目的とした。

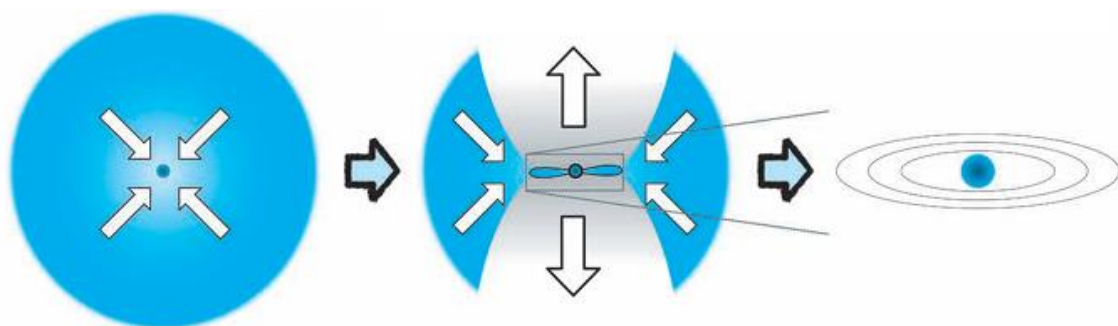


図1 観測天体の情報[3]

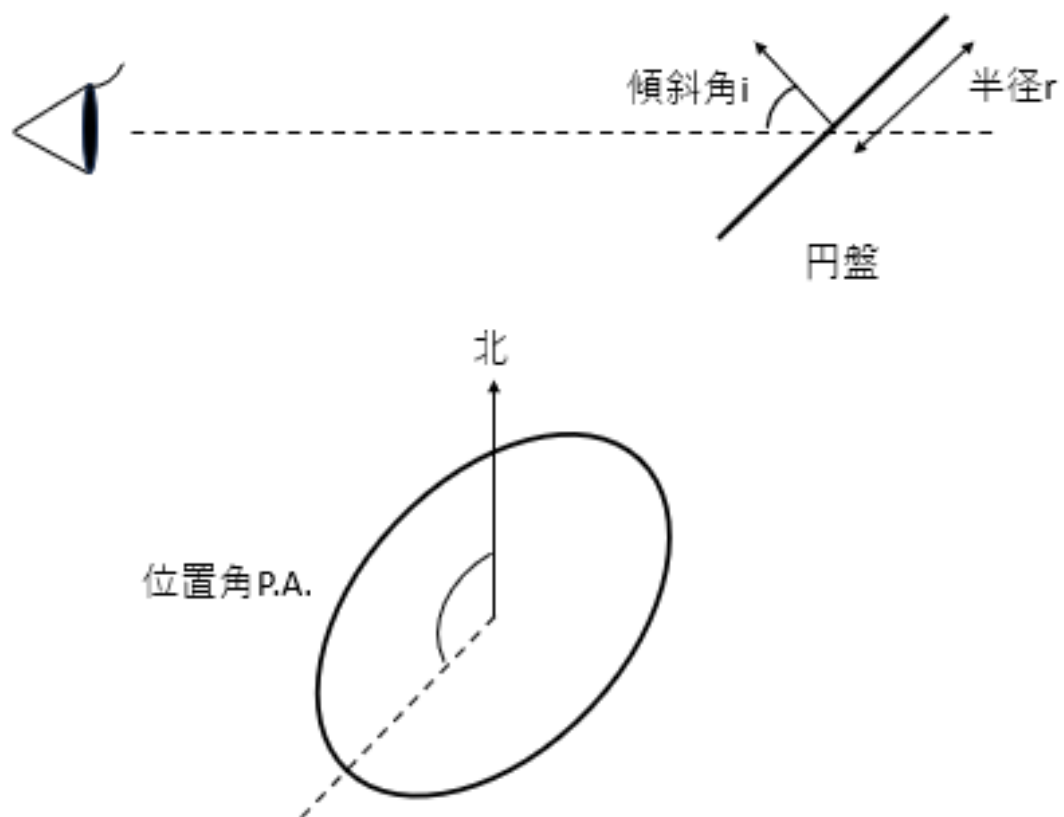


図2 観測天体の傾き角と円盤長軸位置角の測り方

第2章 観測データ

本研究の対象天体は HL Tauri である。解析には ALMA 望遠鏡で 3 つの周波数で観測したデータを用いた。

観測に使用した ALMA 望遠鏡は、66 台のアンテナで構成される電波干渉計である。電磁波スペクトルのミリ波からサブミリ波の領域にある電波の波長範囲で宇宙を観測している。干渉計では、観測周波数が高いほど、得られる解像度は高くなる。ALMA 望遠鏡には 8 個の受信機が各アンテナに設置されており、受信機ごとにカバーしている波長が異なる。

今回構造解析に使用した Band7、Band6、Band3 はそれぞれ 0.8-1.1mm、1.1-1.4mm、2.6-3.6mm の波長範囲をカバーしている。

また、 1σ レベルは円盤からの放射が無視できる領域での画像上の揺らぎを意味し、マップ上で測定した。

表 1：各周波数における観測データの情報

バンド名	Band7	Band6	Band3
周波数	343GHz	233GHz	101GHz
ピクセル数	2048×2048	1600×1600	8000×8000
1 ピクセルあたりの 角度	3.5mas(0.49au)	5mas(0.7au)	10mas(1.4au)
ビームサイズ	29.9mas×19.0mas	35.1mas×21.8mas	85.3mas×61.1mas
1σ	2.3×10^{-5} Jy/beam	1.1×10^{-5} Jy/beam	2.2×10^{-5} Jy/beam
観測日	2014/10/30	2014/10/24	2014/10/14

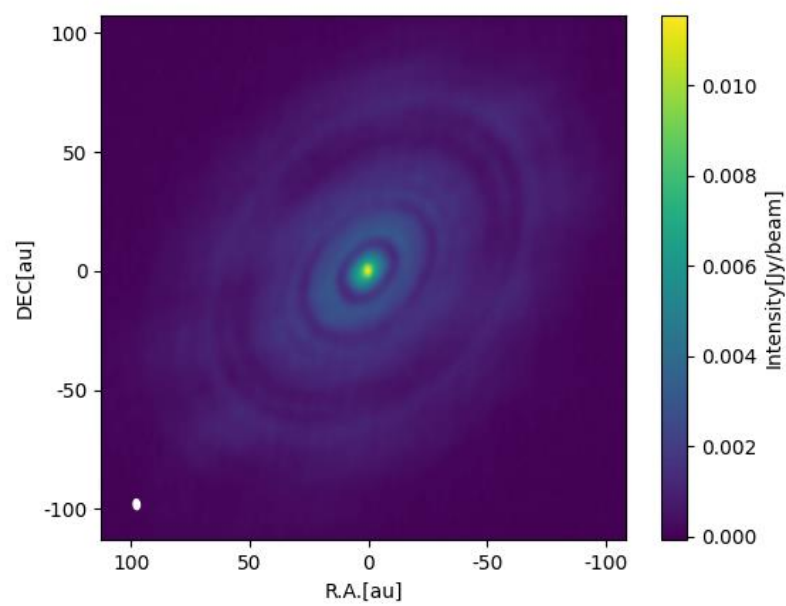


図 3 Band7 で観測した HL Tauri

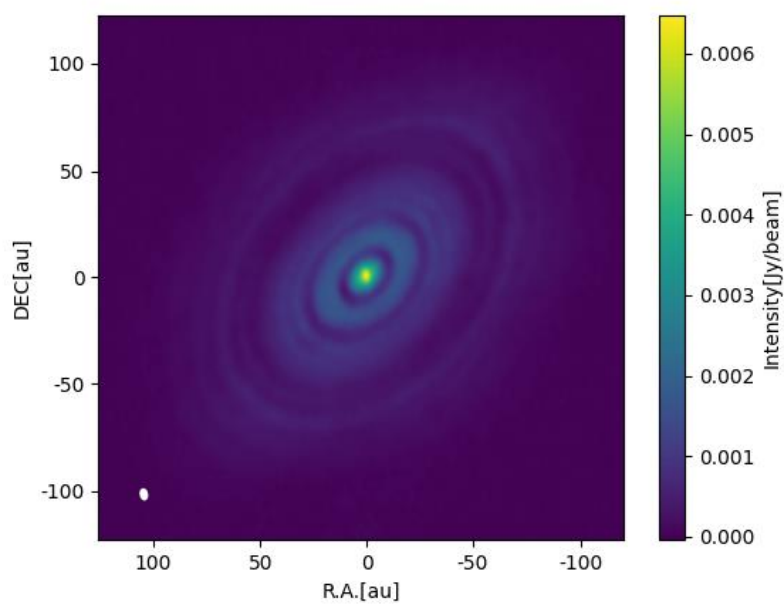


図 4 Band6 で観測した HL Tauri

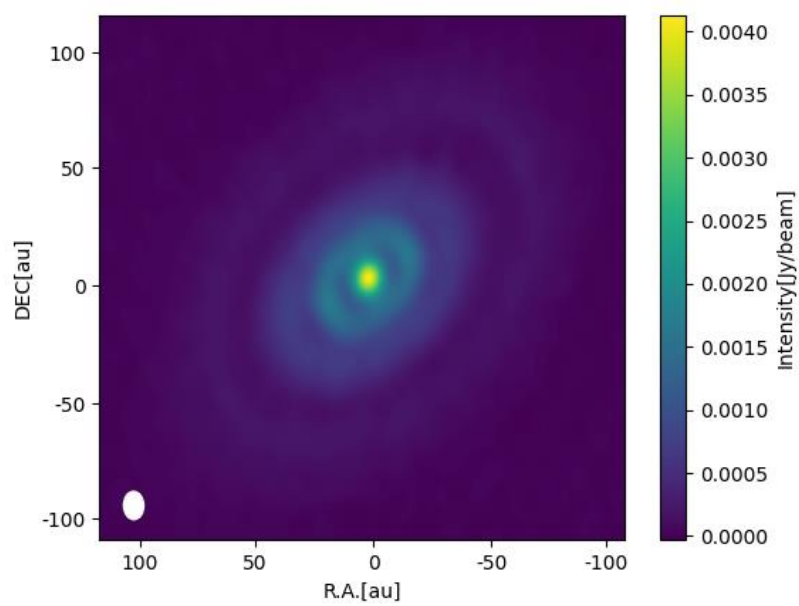


図 5 Band3 で観測した HL Tauri

第3章 解析方法

各周波数画像の fits データを読み取り、最も輝度が高い点を中心点とし、円盤の長軸方位角、及び傾き角を補正した全方位角方向で平均した輝度を半径 (au : 天文単位) との関係で示した。なお、角度から半径へ換算する際には、HLTau までの距離として 140pc を仮定した。作業には CARTA という画像解析ツールを用いた。

その後、平均した輝度を長軸の位置角と円盤軸の傾き角を考慮して画像化した (図 1)。

観測で取得されたデータから方位角平均輝度を差し引いた残差を求め、残差の図に元データの等高線を引き、更に中心からの輝度分布を示した。

第4章 結果

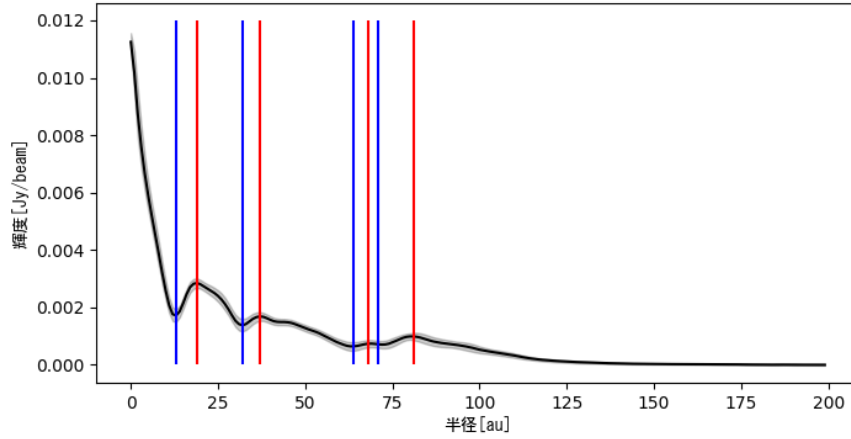


図6 Band7 における半径と平均輝度の関係

黒線は各半径における平均輝度を表している。グレーはエラーバーを示しており、標準偏差を用いた。青線は極小値、赤線は極大値を示しており、左から 13,19,32,37,64,68,71,81[au] である。

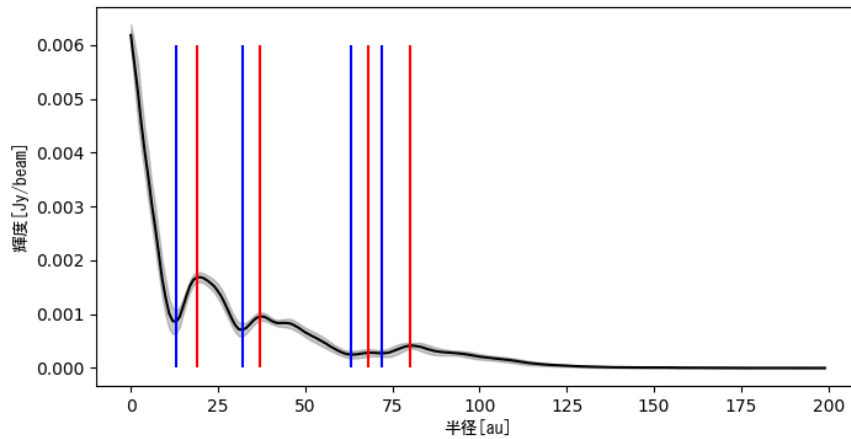


図7 Band6 における半径と平均輝度の関係

黒線は各半径における平均輝度を表している。グレーはエラーバーを示しており、標準偏差を用いた。青線は極小値、赤線は極大値を示しており、左から 13,19,32,37,63,68,72,80[au] である。

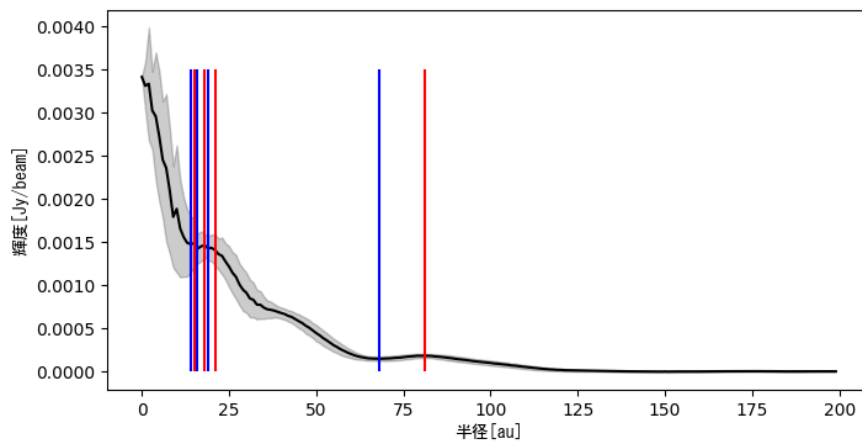


図8 Band3 における半径と平均輝度の関係

黒線は各半径における平均輝度を表している。グレーはエラーバーを示しており、標準偏差を用いた。青線は極小値、赤線は極大値を示しており、左から 14,15,16,18,19,21,68,81 [au]である。

Band7・Band6 ではリングギャップを 4 つ確認できたが、Band3 では極値が Band7・Band6 に比べ顕著に見られず、なだらかなグラフになっている。また、Band3 は極値が見られないため、Band7・Band6 に比べリングギャップ同士の間隔が広い。

今回使用したエラーバーは標準偏差を用いたが、標準偏差はデータのばらつきを示す統計量であるため、エラーバーの長さが長いほど標本のばらつきが大きい。図 6、7、8 について、周波数が低くなるにつればらつきが大きくなっている。特に Band3 は顕著である。ばらつきが大きい程、測定の精度が低いと言える。以上より、周波数が低いと解像度が低くなる上に輝度の測定精度が低いことが確認できた。

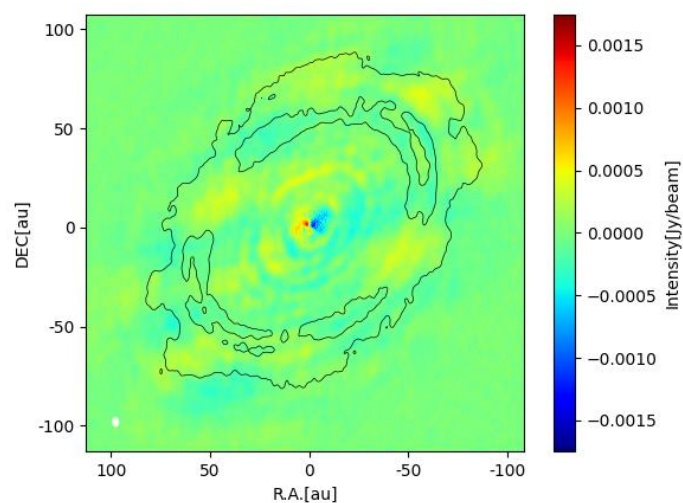


図 9 Band7 における残差

残差の実際のデータの値とカラースケールの最大値と最小値を合わせている。横軸は赤経、縦軸は赤緯を表している。

左下の白色は各周波数におけるビームサイズを表している。黒線は、元データの 30σ のコントアを表している。

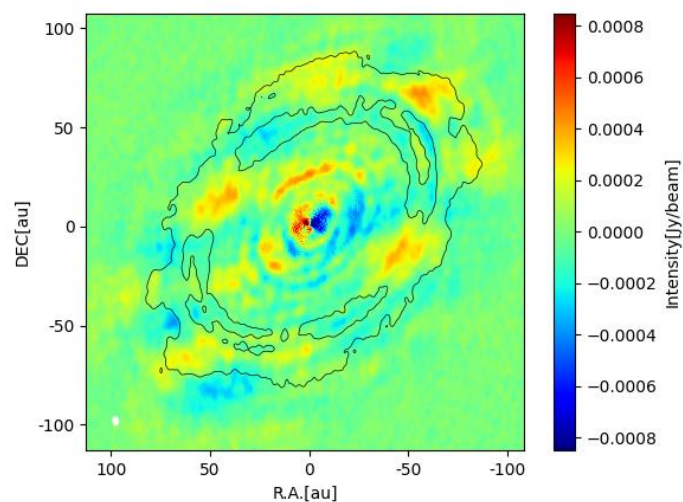


図 10 Band7 における残差

残差のカラースケールの最大値は図 9 の半分の値で、最小値も同様である。横軸は赤経、縦軸は赤緯を表している。左下の白色は各周波数におけるビームサイズを表している。黒線は、元データの 30σ のコントアを表している。

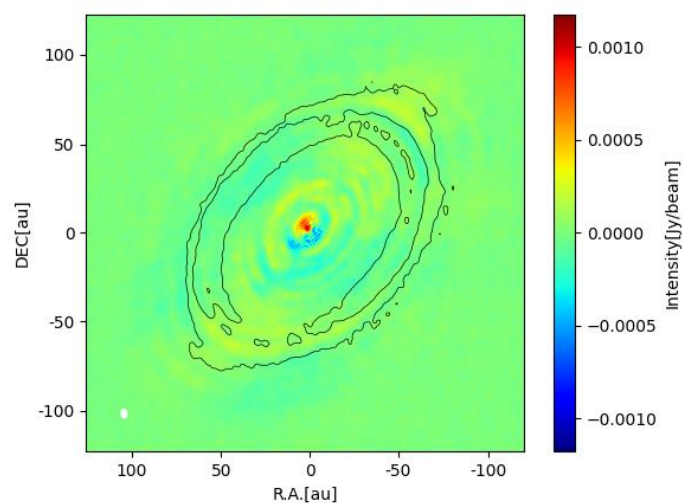


図 11 Band6 における残差

残差の実際のデータの値とカラースケールの最大値と最小値を合わせている。横軸は赤経、縦軸は赤緯を表している。

左下の白色は各周波数におけるビームサイズを表している。黒線は、元データの 30σ のコントアを取る場合を表している。

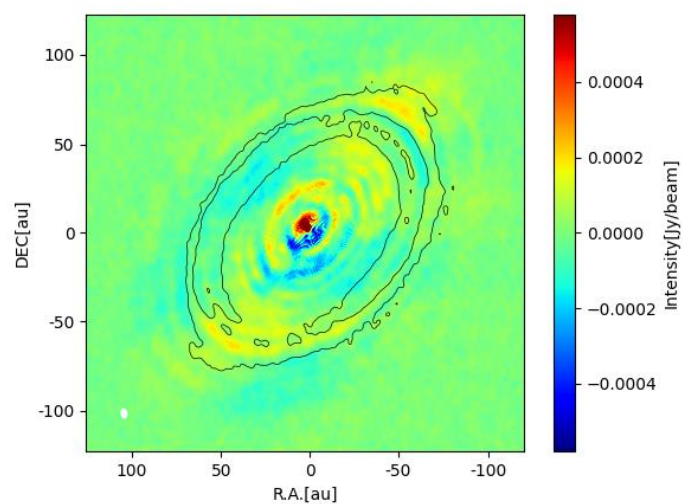


図 12 Band6 における残差

残差のカラースケールの最大値は図 11 の半分の値で、最小値も同様である。横軸は赤経、縦軸は赤緯を表している。左下の白色は各周波数におけるビームサイズを表している。黒線は、元データの 30σ のコントアを表している。

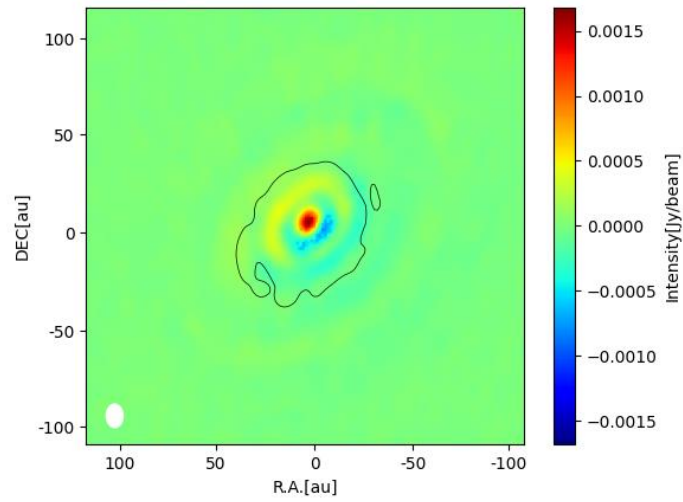


図 13 Band3 における残差

残差の実際のデータの値とカラースケールの最大値と最小値を合わせている。横軸は赤経、縦軸は赤緯を表している。

左下の白色は各周波数におけるビームサイズを表している。黒線は、元データの 30σ のコントアを取る場合を表している。

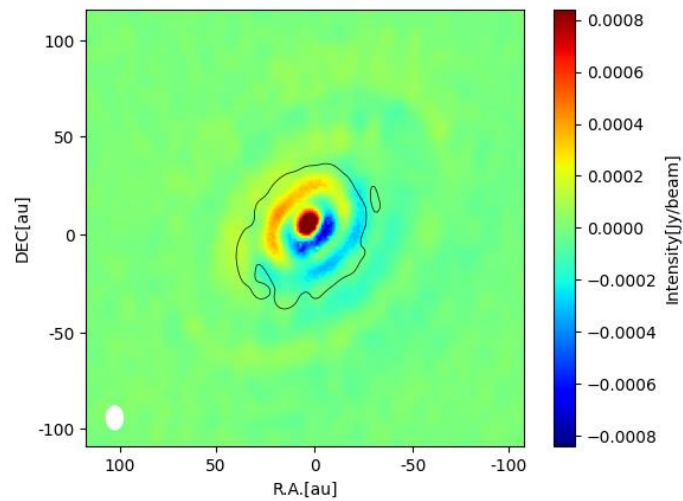


図 14 Band3 における残差

残差のカラースケールの最大値は図 13 の半分の値で、最小値も同様である。横軸は赤経、縦軸は赤緯を表している。左下の白色は各周波数におけるビームサイズを表している。黒線は、元データの 30σ のコントアを表している。

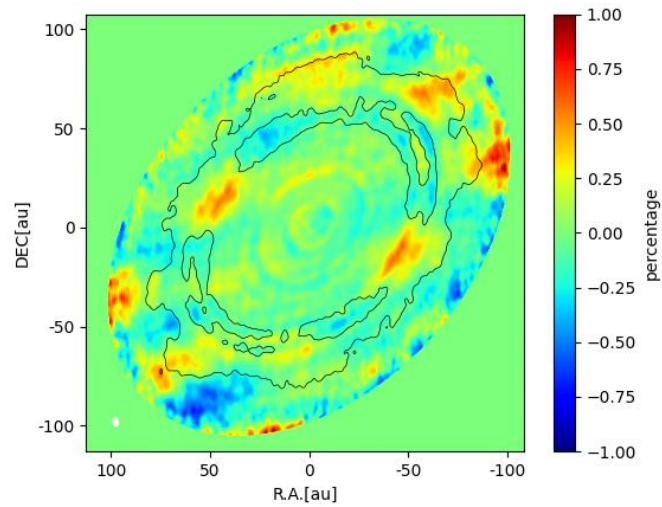


図 15 Band7 における平均輝度の楕円に対する残差の割合

横軸は赤経、縦軸は赤緯を表している。左下の白色は各周波数におけるビームサイズを表している。黒線は、元データの 30σ のコントラストを表している。

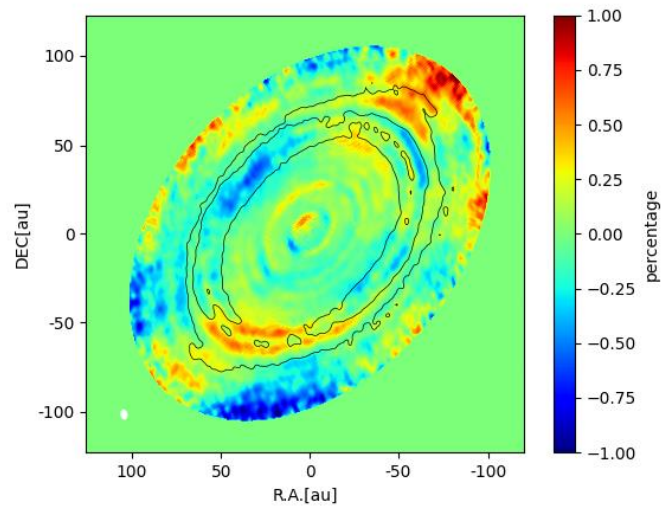


図 16 Band6 における平均輝度の楕円に対する残差の割合

横軸は赤経、縦軸は赤緯を表している。左下の白色は各周波数におけるビームサイズを表している。黒線は、元データの 30σ のコントラストを表している。

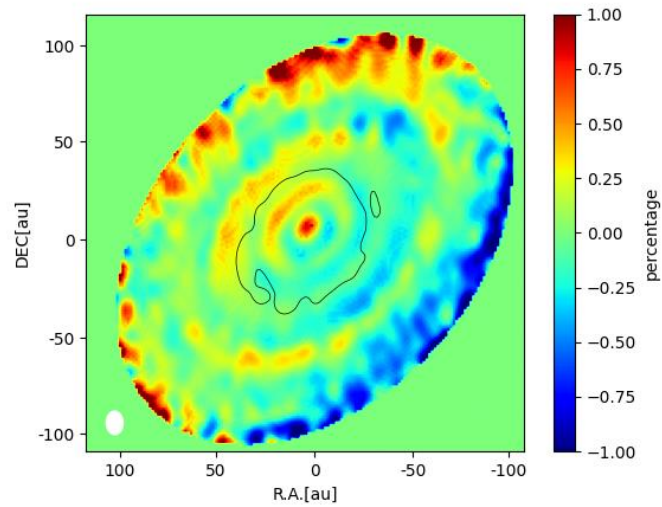


図 17 Band3 における平均輝度の楕円に対する残差の割合

横軸は赤経、縦軸は赤緯を表している。左下の白色は各周波数におけるビームサイズを表している。黒線は、元データの 30σ のコントラストを表している。

残差について、各 Band の輝度の最大値を基準とし、最大値と最小値の絶対値を揃えて画像化した。それが図 9、11、13 である。この時、周波数に関わらず、長軸に対し均等に残差が分布されているのが確認できた。

その後、輝度の最大値の半分の値を改めて最大値に設定し、最大値と最小値の絶対値を揃えて画像化した。それが図 10、12、14 である。半分の値にしたことで、より残差の分布が分かりやすくなった。周波数に関わらず、中心付近で左上の残差は大きく、右下の残差は小さくなるのが確認できた。また、図 12 の Band6 について、長軸方向に残差が確認できた。また、各 Band で平均輝度の楕円に対する残差の割合を画像化した。それが図 15、16、17 である。中心付近を見ると、割合が高いところは約 0.25、割合が低いところは約 -0.25 となった。また、Band3 では Band6・7 に比べ左上の方が割合は約 0.5 と高くなる部分が見受けられた。

第5章 考察

周波数は Band7 の周波数の約 2/3 が Band6、約 1/3 が Band3 である。一般的に輝度は輻射輸送の式を用いて以下のような関係で表すことができる。

$$I_\nu = B_\nu(T)(1 - e^{-\tau_\nu})$$

$$\tau_\nu \ll 1 \rightarrow I_\nu = \tau_\nu B_\nu$$

$$\tau_\nu \gg 1 \rightarrow I_\nu = B_\nu$$

$$(\tau_\nu = \kappa_{\text{abs}} \Sigma_{\text{d}}, \kappa_{\text{abs}} \propto \nu^\beta)$$

(I_ν : 輝度[Jy/beam]、 B_ν : プランク関数[T]、 τ_ν : 光学的厚み、 Σ_{d} : 柱密度[g/cm²]、 κ_{abs} : 吸収係数[cm²/g]、 β : スペクトル指数[2])

周波数が低いとき、光学的厚みは小さくなりやすく輝度は柱密度と温度に依存する。一方、周波数が高いとき、光学的厚みは大きくなりやすく、光学的に厚い場合の輝度は温度のみに依存する。

Band7 は高周波数であり円盤は光学的に厚いとみられるため、輻射輸送の式より温度のみに依存する。その場合輝度はべき乗の形で表されると考えられる。だが、Band7 ではリングギャップが確認できた。そのため、谷になっている部分は光学的に薄いと考えられる。

また、残差について、左上側の割合が高く右下の割合が低い。このことから、元データに対し平均輝度から求めた楕円が左上側に少しずれているのではないかと考える。その原因として、先行研究[2]の P.A.や自分で求めた中心点がずれているのではないかと考える。

更に、Band6 で長軸方向における残差が大きいことが確認できる。視線方向（長軸方向）で柱密度は大きく、低周波数では光学的厚みが大きいと輝度は高くなるからだと考える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である百瀬宗武教授には、電波天文学や原始惑星系円盤の基礎や研究に必要な知識について丁寧にご指導と助言をいただき深く感謝致します。また、米倉覚則教授には、ゼミや高萩見学など様々な場所でご指導いただきました。さらに、研究室の先輩である折原龍太氏には基礎的な知識や python の使い方など、多くの場面で根気強く丁寧に教えてくださりました。

最後に、研究室の皆様には本研究の遂行にあたり多大なご助言、ご協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1]百瀬宗武、2019、原始惑星系円盤の電波観測入門(1)：惑星系の母胎を探る
- [2]Zhang、2015、 Evidence of fast pebble growth near condensation fronts in the HL Tau protoplanetary disk
- [3][111-4_234.pdf \(asj.or.jp\)](#)
- [4]Brogan、2015、 The 2014 ALMA long baseline campaign :First results from angular resolution observations toward the HL Tau region
- [5]Okuzumi 、 2016 、 Sintering-induced dust ring formation in protoplanetary disks:Application to the HL Tau disk
- [6]Tapia、2019、 Exploring the grain properties in the Disk of HL Tau with an evolutionary model
- [7]CARTA、 <https://cartavis.org/>

付録

本研究を行うにあたって使用したコードをまとめた。

```
import astropy.io.fits as iofits
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#関数 search_index:array と value の差の 2 乗が一番小さい値を index で返す
def search_index(array, value):
    index=np.argmin((array-value)**2)
    return index

#関数 slice:header から必要な情報を導出
def slice(fits,centery,centerx,dpc):
    hdulist= iofits.open(fits)
    hdu= hdulist[0]
    hdr= hdu.header
    data= hdu.data
    datab=data[0,0,:,:]

    cd=hdr["CDELT2"]
    pix=cd*3600*dpc
    na2=hdr["NAXIS2"]
    x=np.arange(0,na2,1)
    na1=hdr["NAXIS1"]
    y=np.arange(0,na1,1)
    xau=(x-centerx)*pix
    yau=-(y-centery)*pix
    Y,X=np.meshgrid(yau,xau)

    print(fits+' / ピクセルサイズ: '+str(np.round(pix, 2))+ ' au、ピクセル数: '+str(datab.shape))

    return hdulist,hdr,cd,na1,na2,datab, X, Y, xau, yau
```

```
hdulist, hdr, cd, na1, na2, datab, X, Y, xau, yau = slice( "B7-
Cont.fits", 1029, 1080, 140)
```

```
#関数 intensity: 半径や角度、輝度の情報の導出
```

```
def intensity(PA, i, X, Y, na1, na2, rangei, datab):
```

```

    from numpy import pi
    R=(X**2+Y**2)**0.5
    θ= np.arctan2(Y,X)
    θr=np.radians(PA)
    Yθ=Y*np.cos(θr)-X*np.sin(θr)
    Xθ=Y*np.sin(θr)+X*np.cos(θr)
    Yθ=Yθ/np.cos(np.radians(i))
    Rθ=(Xθ**2+Yθ**2)**0.5

    I=[]
    std=[]
    R=[]
    imageI_ellipse=np.zeros((na1, na2))
    for Ri in range(θ, rangei, 1):
        R.append(Ri)
        mask=(Rθ>=Ri)&(Rθ<Ri+1)
        Ii=np.mean(datab[mask])
        s=np.std(datab[mask])
        imageI_ellipse[mask]=Ii
        I.append(Ii)
        std.append(s)
    I=np.array(I)
    std=np.array(std)
    R=np.array(R)

    return Rθ, R, I, std, imageI_ellipse
```

```

R0,R,I,std,imageI_ellipse=intensity(138,46.2,X,Y,na1,na2,200,datab)

#半径と平均輝度の関係(エラーバー、極値もつける)
plt.figure(figsize=(8, 4))
lower_limit = I - std
upper_limit = I + std
plt.fill_between(R, lower_limit, upper_limit, color='black', alpha=0.2)
plt.plot(R,I,color='black')
plt.vlines(x=13, ymin=0, ymax=0.012, colors='b')
plt.vlines(x=32, ymin=0, ymax=0.012, colors='b')
plt.vlines(x=64, ymin=0, ymax=0.012, colors='b')
plt.vlines(x=71, ymin=0, ymax=0.012, colors='b')
plt.vlines(x=19, ymin=0, ymax=0.012, colors='r')
plt.vlines(x=37, ymin=0, ymax=0.012, colors='r')
plt.vlines(x=68, ymin=0, ymax=0.012, colors='r')
plt.vlines(x=81, ymin=0, ymax=0.012, colors='r')
plt.xlabel('半径[au]',fontname="MS Gothic")
plt.ylabel('輝度[Jy/beam]',fontname="MS Gothic")
plt.savefig("I_B7-Cont.png")
plt.close()

#平均輝度でできた楕円の表示
imI_ellipse = plt.imshow(imageI_ellipse, origin="lower")
plt.colorbar(imI_ellipse, label='Intensity[Jy/beam]')
plt.xlabel('R.A.[au]')
plt.ylabel('DEC[au]')
plt.savefig("imI_ellipse_B7-Cont.png")
nhdu = iofits.PrimaryHDU(imageI_ellipse.reshape(1,1,2048,2048), hdr)
newhdulist = iofits.HDUList([nhdu])
newhdulist.writeto('fits_imI_ellipse_B7-Cont.fits',overwrite=True)
plt.close()

#平均輝度でできた楕円の表示(より楕円部分のみを表示できるように)
imageI_ellipse2=imageI_ellipse[850:1300,800:1250]

```

```

Xs=X[850:1300,800:1250]
Ys=Y[850:1300,800:1250]
xs=Xs[:,0]
ys=Ys[0]
xnew=[100,50,0,-50,-100]
ynew=[100,50,0,-50,-100]

xind=[]
for i in xnew:
    xind.append(search_index(xs, i))
yind=[]
for i in ynew:
    yind.append(search_index(ys, i))

imI_ellipse2 = plt.imshow(imageI_ellipse2, origin="lower")
plt.colorbar(imI_ellipse2, label='Intensity[Jy/beam]')
plt.xlabel('R.A.[au]')
plt.ylabel('DEC[au]')
plt.xticks(yind, ynew)
plt.yticks(xind, xnew)
plt.savefig("imI_ellipse2_B7-Cont.png")
plt.close()

#元画像の表示(より楕円部分のみを表示できるように)
datab2=datab[850:1300,800:1250]
import matplotlib.patches as pat
mj=hdr["BMAJ"]
major=mj/cd
mi=hdr["BMIN"]
minor=mi/cd
mp=hdr["BPA"]
ellipse = pat.Ellipse(xy=(30,30), width=major, height=minor, fc="white",
ec="white", angle=mp+90)
imdata2 = plt.imshow(datab2, origin="lower")
plt.colorbar(imdata2, label='Intensity[Jy/beam]')
plt.xlabel('R.A.[au]')

```

```

plt.ylabel('DEC[au]')
plt.xticks(yind, ynew)
plt.yticks(xind, xnew)
plt.gca().add_patch(ellipse)
plt.savefig("imdata02_B7-Cont.png")
plt.close()

# 元画像から平均して作った楕円を引き残差を求めて表示する
imageI_residual = datab - imageI_ellipse
imI_residual=plt.imshow(imageI_residual, origin='lower')
plt.colorbar(imI_residual, label='Intensity[Jy/beam]')
plt.xlabel('R.A.[au]')
plt.ylabel('DEC[au]')
plt.savefig("imI_residual_B7-Cont.png")
nhdu1 = iofits.PrimaryHDU(imageI_residual.reshape(1,1,2048,2048), hdr)
newhdulist = iofits.HDUList([nhdu1])
newhdulist.writeto('fits_imI_residual_B7-Cont.fits', overwrite=True)
plt.close()

#残差の表示(より楕円部分のみを表示できるように)
imageI_residual2=imageI_residual[850:1300,800:1250]
R02=R0[850:1300,800:1250]
sigma_e=2.3E-5
ellipse = pat.Ellipse(xy=(30,30), width=major, height=minor, fc="white",
ec="white", angle=mp+90)
vmax=0.001748
vmin=-0.001748
imI_residual2 = plt.imshow(imageI_residual2,origin="lower", cmap='jet',
vmin=vmin, vmax=vmax)
plt.colorbar(imI_residual2, label='Intensity[Jy/beam]')
plt.contour(datab2,levels=[20*sigma_e], colors=['black'], linewidths=0.5)
plt.xlabel('R.A.[au]')
plt.ylabel('DEC[au]')
plt.xticks(yind, ynew)
plt.yticks(xind, xnew)

```

```

plt.gca().add_patch(ellipse)
plt.savefig("imI_residual2_B7-Cont.png")
plt.close()

#残差の表示(最大値と最小値を一つ前の画像の半分になるように表示)
ellipse = pat.Ellipse(xy=(30,30), width=major, height=minor, fc="white",
ec="white", angle=mp+90)
vmax=0.00085
vmin=-0.00085
imI_residual2 = plt.imshow(imageI_residual2,origin="lower", cmap='jet',
vmin=vmin, vmax=vmax)
plt.colorbar(imI_residual2, label='Intensity[Jy/beam]')
plt.contour(datab2,levels=[20*sigma_e], colors=['black'], linewidths=0.5)
plt.xlabel('R.A.[au]')
plt.ylabel('DEC[au]')
plt.xticks(yind, ynew)
plt.yticks(xind, xnew)
plt.gca().add_patch(ellipse)
plt.savefig("imI_residualnew_B7-Cont.png")
plt.close()

hdulist.close()

```