

卒業論文

おうし座H L 星に付随する原始惑星系円盤に関する
ALMA データの解析

2016 年度
(平成 28 年度)

茨城大学 理学部 理学科 学際理学コース

13s6029s

西村花菜

概要

星は分子雲コアの中心部分が収縮し、その周りのガスが降着することで形成されと考えられている。誕生した原始星が太陽質量程度まで成長すると周囲のガスは星周円盤に降着するようになる。のちにこの星周円盤で惑星が形成されと考えられているため、原始惑星系円盤と呼ばれる。原始惑星系円盤の構造を解明することは、惑星系誕生の謎を紐解くために極めて重要である。

本研究では星周円盤を有するおうし座HL星を対象に、先行研究と比較し再現性を論じること、また導出した結果に基づいて新たな物理量を推定することを目的として、ALMAによる観測で得られたデータの解析を行った。

ダスト連続波放射強度と **Band6+7** におけるスペクトル指数の解析結果は先行研究とよく一致した。またそれぞれの周波数帯での輝度温度を導出し、**Band7** の結果から円盤中の実際の温度を仮定することで先行研究では扱っていない周波数帯のスペクトル指数とそれに対応する柱密度を推定した。

目次

第1章	序論	1
1-1	原始惑星系円盤	1
1-2	おうし座HL星円盤	2
1-3	ダスト連続波放射	3
第2章	解析	4
2-1	解析データ	4
2-2	解析方法	4
	[1]ダスト連続波放射強度	4
	[2]輝度温度	4
	[3]物理量の導出	5
第3章	解析結果・考察	6
	[1]ダスト連続波放射強度	6
	[2]輝度温度	10
	[3]物理量の導出	13
第4章	まとめ	17
付録		18
	・強度の単位変換	18
	・輝度温度への換算	18
	・ALMA 望遠鏡	19

第1章 序論

1-1 原始惑星系円盤

星や惑星系は星間空間中の分子雲(水素ガス密度: $\sim 10^2$ 個/cm³)で形成される。はじめに分子雲中で特にガス密度が高い領域である分子雲コア(水素ガス密度: 10^4 個/cm³~)の中心部分(水素ガス密度: $\sim 10^6$ 個/cm³)が重力によって収縮し、質量 $0.01M_{\odot}$ 程度の原始星となる。周りのガスは徐々に原始星に降着し、太陽程度の質量まで成長するとその後は角運動量を持っているため周囲の円盤に降着するようになる。星周円盤は初期の質量が大きく、その自己重力により降着が促進されると考えられる。円盤の質量が中心の原始星に比べてとても小さくなる(10%以下)まで降着が進むと、そののちの進化の速度は小さくなる。この段階が惑星形成の舞台で、原始惑星系円盤と呼ばれる。

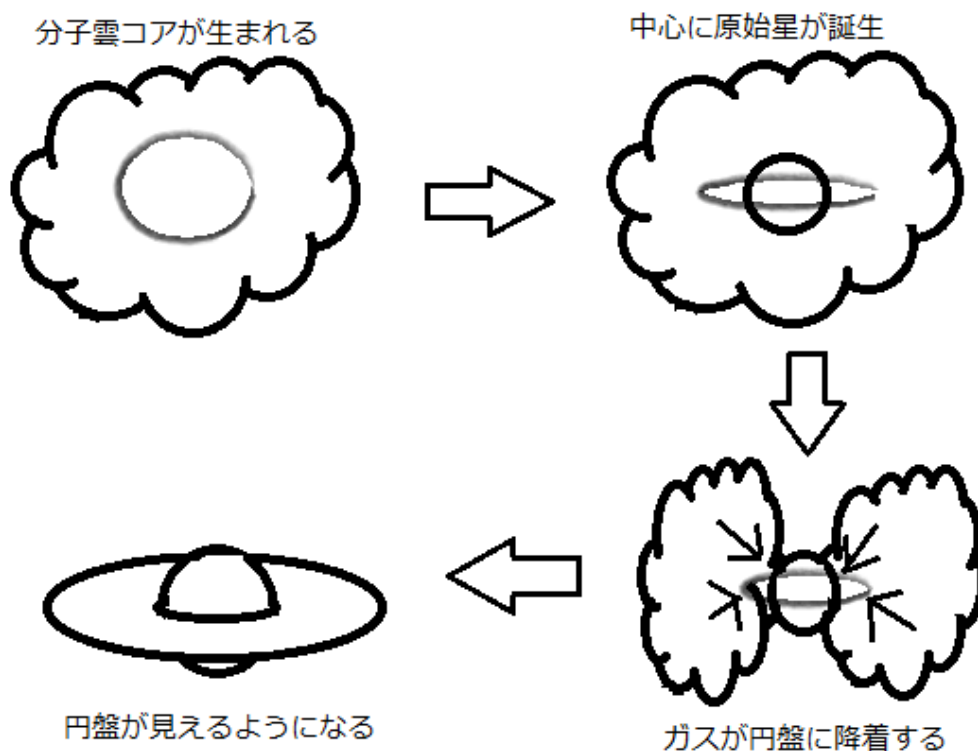
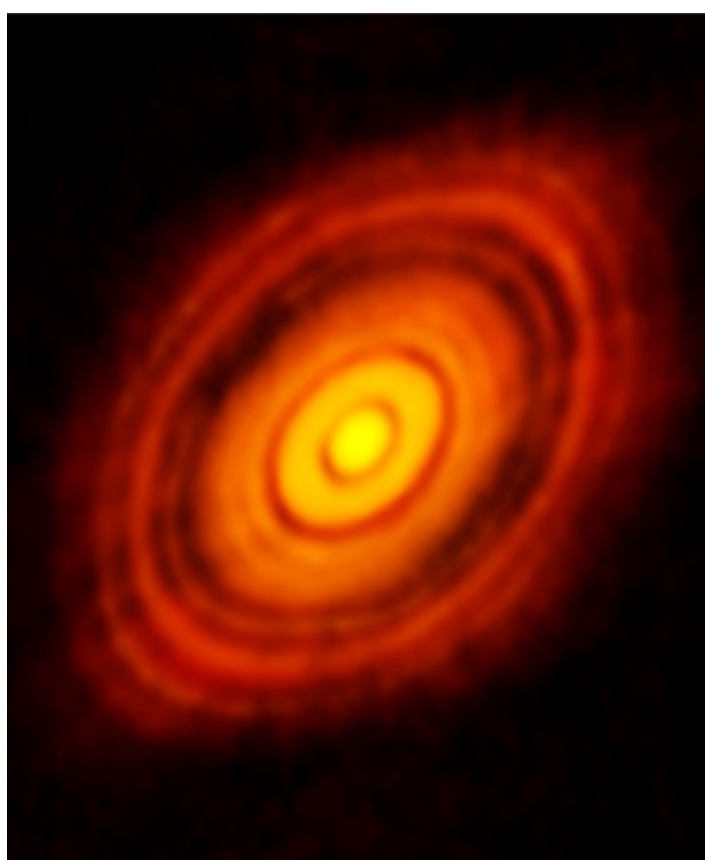


図1 原始惑星系円盤形成過程

1-2 おうし座HL星円盤

おうし座HL星は、地球から距離約 140pc ($1\text{pc}=3.1\times 10^{16}\text{m}$) に位置する年齢 100 万年程度の若い前主系列星である。

円盤の軌道傾斜角は $46^{\circ}.72\pm 0^{\circ}.05$ 、長軸方向のポジションアングル(P.A)は $+138^{\circ}.02\pm 0^{\circ}.07$ で、その若さから原始惑星系円盤であると考えられる。この円盤は強く電波を放射しているため試験観測天体に適しており、2014 年 ALMA 長基線観測によって円盤がはっきりとした環構造を持つことが明らかになった。



Credit ALMA(ESO/NAOJ/NRAO),230GHz

図 2 おうし座HL星円盤(Band6 データによる画像)

1-3 ダスト連続波放射

電波の周波数に対するエネルギー分布には大きく分けて連続スペクトルと線スペクトルの2種類ある。

本研究では、連続スペクトルのうち固体微粒子(星間塵、星間ダスト)からの熱放射によるものを扱う。

・ 光学的厚み τ_ν

$$\tau_\nu = \int \rho \kappa_{\rho\nu} ds \quad (\rho: \text{星間物質の密度} \quad \kappa_{\rho\nu}: \text{単位質量あたりの吸収係数})$$

$\tau_\nu < 1$ の時、“光学的に薄い”、 $\tau_\nu \geq 1$ の時、“光学的に厚い”と表現される。

・ 電波領域での放射強度 I_ν [W/m² Hz sr] とスペクトル指数 α

入射した電磁波を100%吸収する理想的な物体を黒体と呼び、そこから放射される電磁波を黒体放射という。

黒体放射の強度 B_ν [W/m² Hz sr] はプランクの放射式

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad \left(\begin{array}{l} h = 6.63 \times 10^{-34} \left[\frac{J}{s} \right]: \text{プランク定数} \\ T: \text{温度}[K] \end{array} \right) \dots(1)$$

と表される。

光学的に厚い場合→物質は黒体に近づく

$$I_{\nu \text{ thick}} = B_\nu(T) \approx \frac{2kT}{c^2} \nu^2 \quad \left(\begin{array}{l} k = 1.38 \times 10^{-23} \left[\frac{J}{K} \right]: \text{ボルツマン定数} \\ c = 3.00 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]: \text{光速} \end{array} \right) \dots(2)$$

に対応する。ただしレイリージーンズ近似を用いた。

$$I_{\nu \text{ thick}} \propto \nu^\alpha \quad (\alpha = 2) \dots(3)$$

である。

光学的に薄い($\tau_\nu \ll 1$)場合

固体微粒子が温度 T で熱平衡状態にあるとすると、放射強度 I_ν は、

$$I_\nu = B_\nu(T) (1 - e^{-\tau_\nu}) \approx \tau_\nu B_\nu(T) \dots(4)$$

さらに τ_ν の式を代入して、

$$I_{\nu \text{ thin}} = \kappa_{\rho\nu} B_\nu(T) \int \rho ds \dots(5)$$

と表される。

$\kappa_{\rho\nu} \propto \nu^\beta$ なので、

$$I_{\nu \text{ thin}} \propto \nu^\alpha \quad (\alpha = \beta + 2) \dots(6)$$

第2章 解析

2-1 解析データ

本研究では 2014 年 ALMA 長基線観測によって得られた周波数 101.9、233、343.5、287.2(GHz)におけるダスト連続波放射強度とスペクトル指数のデータを使用した(表 1)。

	Band 3	Band 6	Band 7	Band 6+7
周波数 (GHz)	101.9	233	343.5	287.2
θ_{maj} (mas)	85.3	35.1	29.9	33.5
θ_{min} (mas)	61.1	21.8	19	21.1
角度分解能 (AU)	11.9×8.6	4.9×3.1	4.1×2.7	4.7×3.0
観測日時	2014/10/14	2014/10/24	2014/10/30	2014/10/24

表 1 解析データ

ビームの長軸、短軸の半値幅をそれぞれ θ_{maj} [mas]、 θ_{min} [mas]とし、角度分解能はおうし座HL星と観測地点の距離を 140pc として導出した。

2-2 解析方法

[1]ダスト連続波放射強度

観測データは P.A.=+138° .02±0° .07 であるため、全ての周波数帯(Band)とスペクトル指数(Band6+7)のデータについて円盤の長径が視線方向に対して垂直になるよう回転させた。回転中心は各バンドにおける放射強度の最大値をとる座標、回転角は時計回りに 48° である。(図 2、図 3)

次に放射強度の最大値を含む座標列をそれぞれの長径としてデータを抽出し、縦軸を放射強度[mJy/beam]、横軸を回転中心からの距離[AU]でプロットした。

スペクトル指数(Band6+7)データの回転中心は放射強度に関する Band6+7 座標と等しいとして、同様に操作を行った。

[2]輝度温度

[1]の Band7 データを基に、

$$T_b(K) = 1.222 \times 10^6 \times (\theta_{maj})^{-1} \times (\theta_{min})^{-1} \times \nu^{-2} \times I_\nu \dots (7)$$

を用いて輝度温度(T_b)を推定した。観測周波数のうち分解能が最も高いため Band7 のデータを使用した。

さらに、光学的に厚いと想定される領域での輝度温度を実際の温度 T であるとして Band7 における温度分布を仮定した。

[3]物理量の導出

[2]で仮定した温度 T と Band6、Band7、Band6+7 の放射強度から、

$$I_{\nu thin} = \kappa_{\nu} B_{\nu}(T) \int \rho ds \dots (5)$$

$$\kappa_{\nu} = 0.1 \times \left(\frac{\nu}{1000}\right)^{\beta} \dots (8)$$

を用いて新たにスペクトル指数 α 、柱密度 Σ を導出した。

最も角度分解能の高い Band7 のデータを基準として、Band6、6+7 のデータとそれぞれ連立させ、得られた β の値を Band7 の式(5)、(8)に代入して柱密度分布を導く。求めたいのはスペクトル指数の図であるので、 $\beta + 2 = \alpha$ をプロットする。

同様の解析を Band7 と Band6 についても行った。

なお、Band6 に関してはその他の周波数帯と画素数を統一するため、観測データの 1600 ピクセルから 2040 ピクセルへ変換した。

第 3 章 解析結果・考察

[1]ダスト連続波放射強度

P.A $\approx$ 138 $^{\circ}$ で傾いている観測データを P.A $\approx$ 90 $^{\circ}$ になるように回転させた。

図 2 は回転操作後の放射強度データ、図 3 は同様にして得られたスペクトル指数マップである。

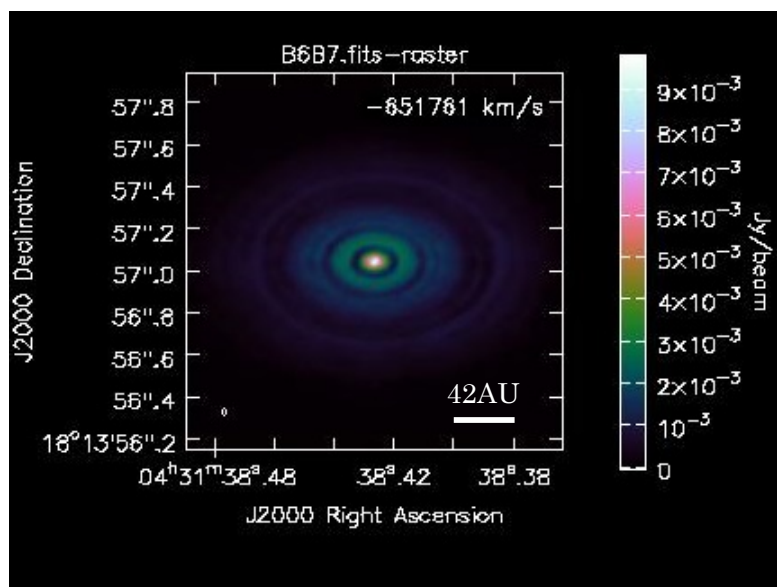


図 3 ダスト連続波放射強度(Band6+7)

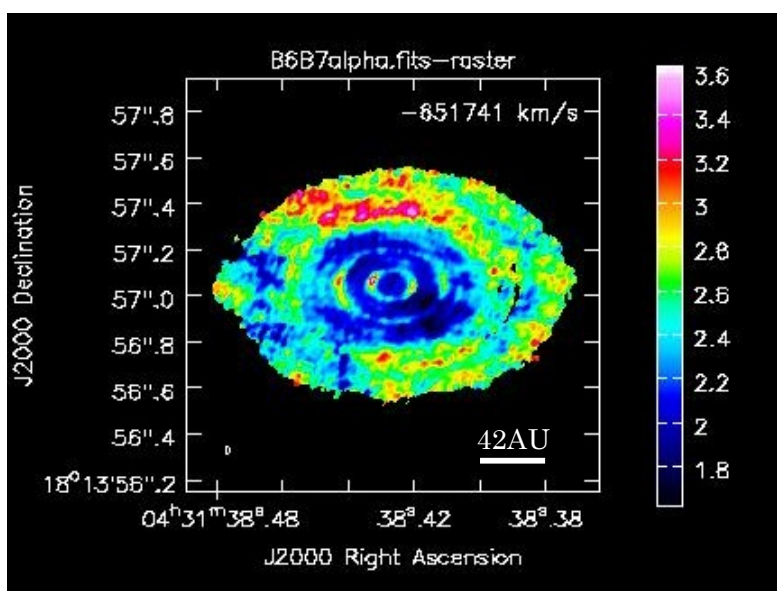


図 4 スペクトル指数マップ(Band6+7)

図 4~7 は各周波数帯における長径の放射強度である。

図 2 の円盤の明環、暗環に対応して強度変化しており、各周波数帯において共通した放射強度の変化が確認できた。

また、スペクトル指数グラフでは放射強度との対応関係がはっきりと現れており、先行研究とも良く一致している。

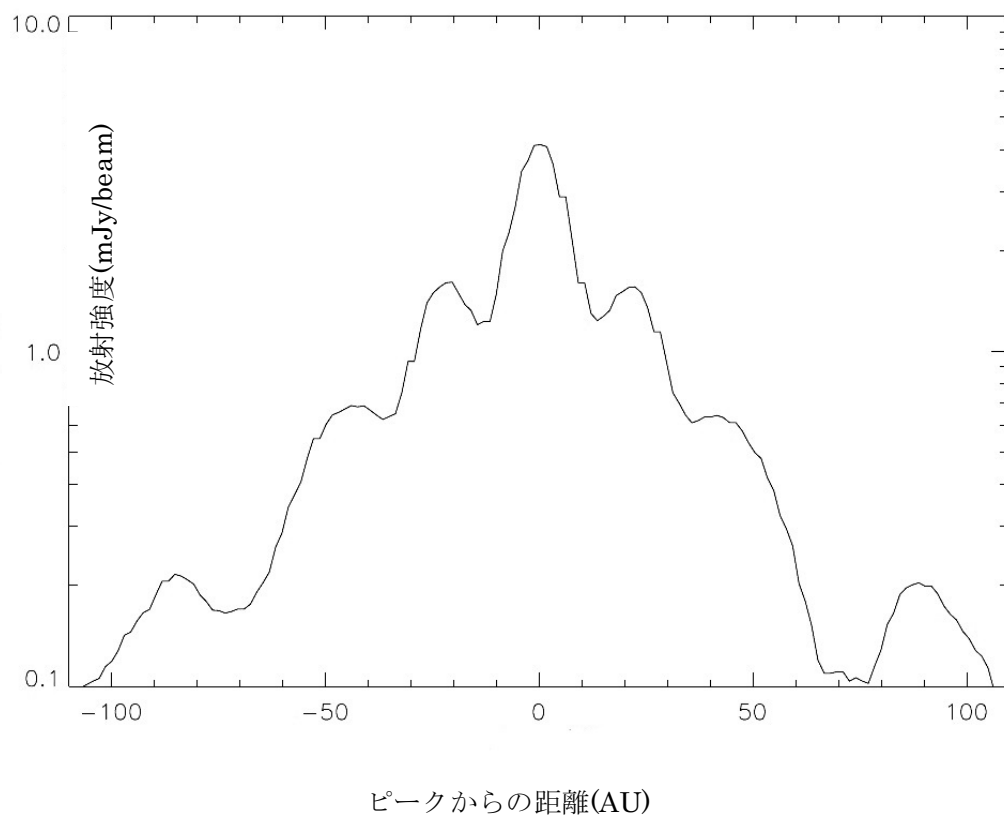


図 5 Band 3 の放射強度

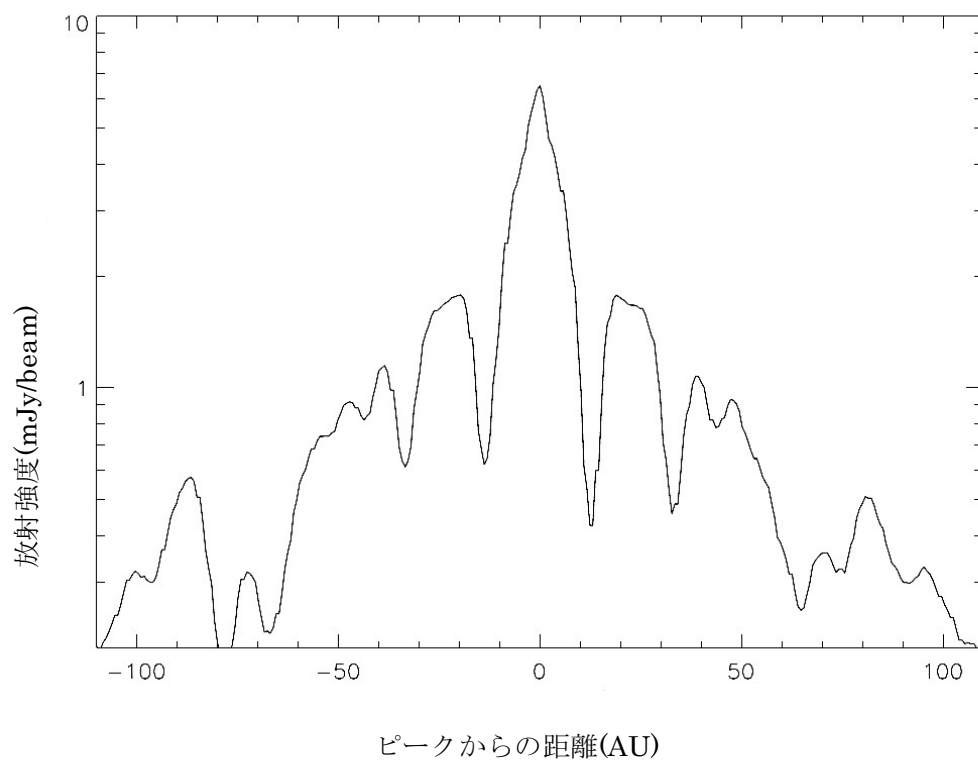


図 6 Band6 の放射強度

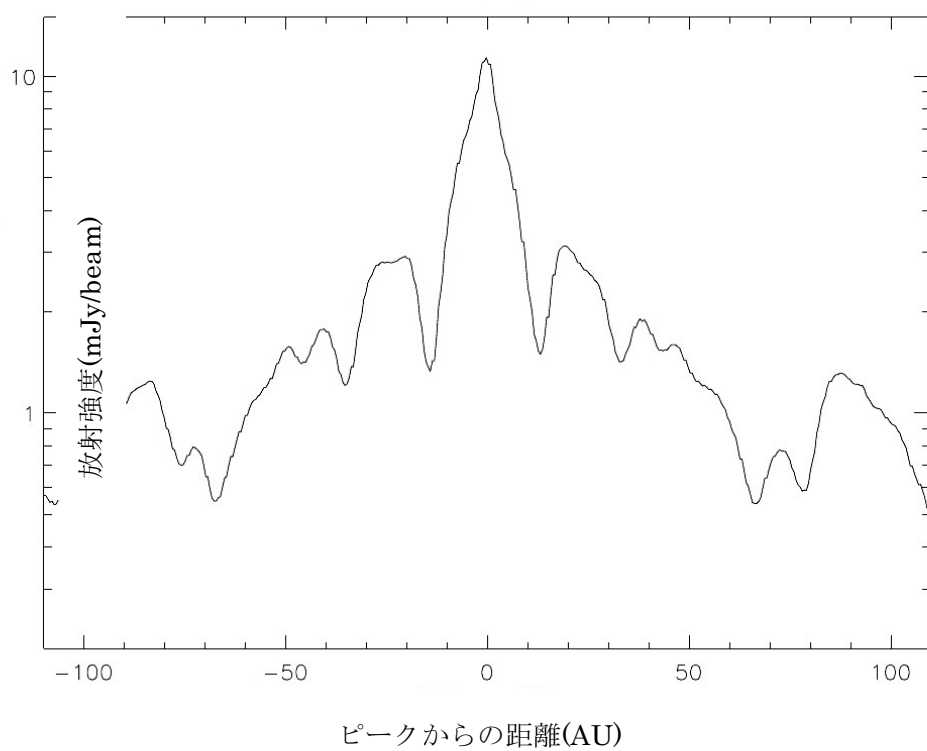
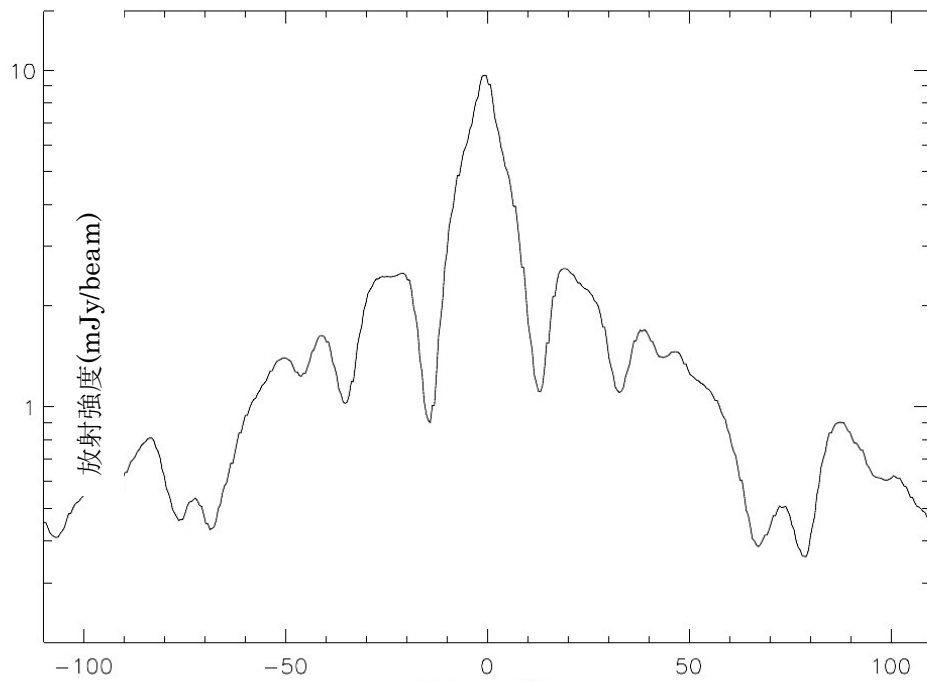
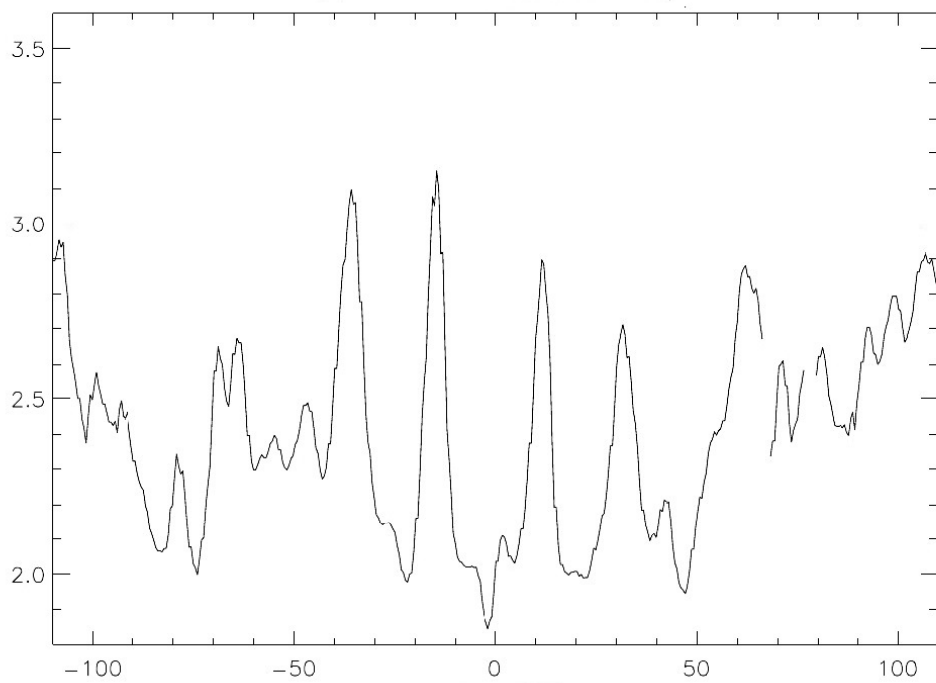


図 7 Band7 の放射強度



ピークからの距離(AU)

図 8 Band6+7 の放射強度



ピークからの距離(AU)

図 9 スペクトル指数(Band6+7)

[2]輝度温度

Band6+7 の結果は先行研究と良く一致した。その他の周波数帯についても同様の変化のパターンが見られた。

図 14 で示すように、温度 T は、光学的に厚いとみられる領域に接する

$$T(K) = 210 \times (x)^{-0.45} \dots (9)$$

の式で仮定することにした。

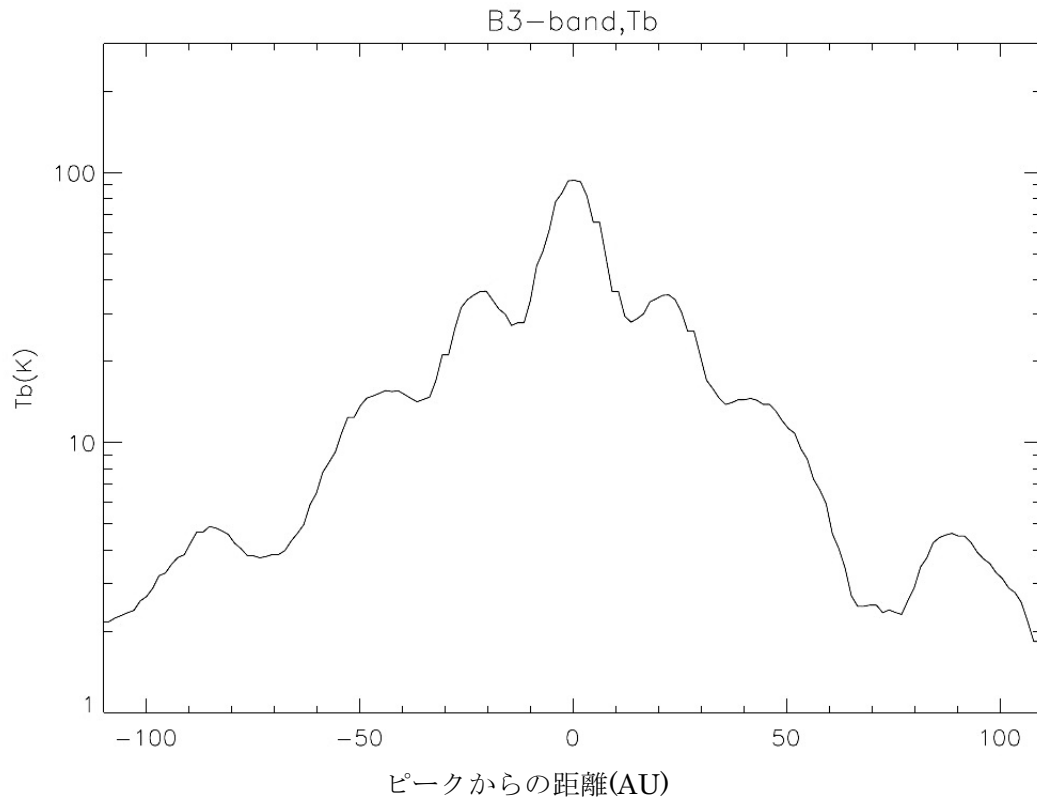


図 10 Band3 の輝度温度

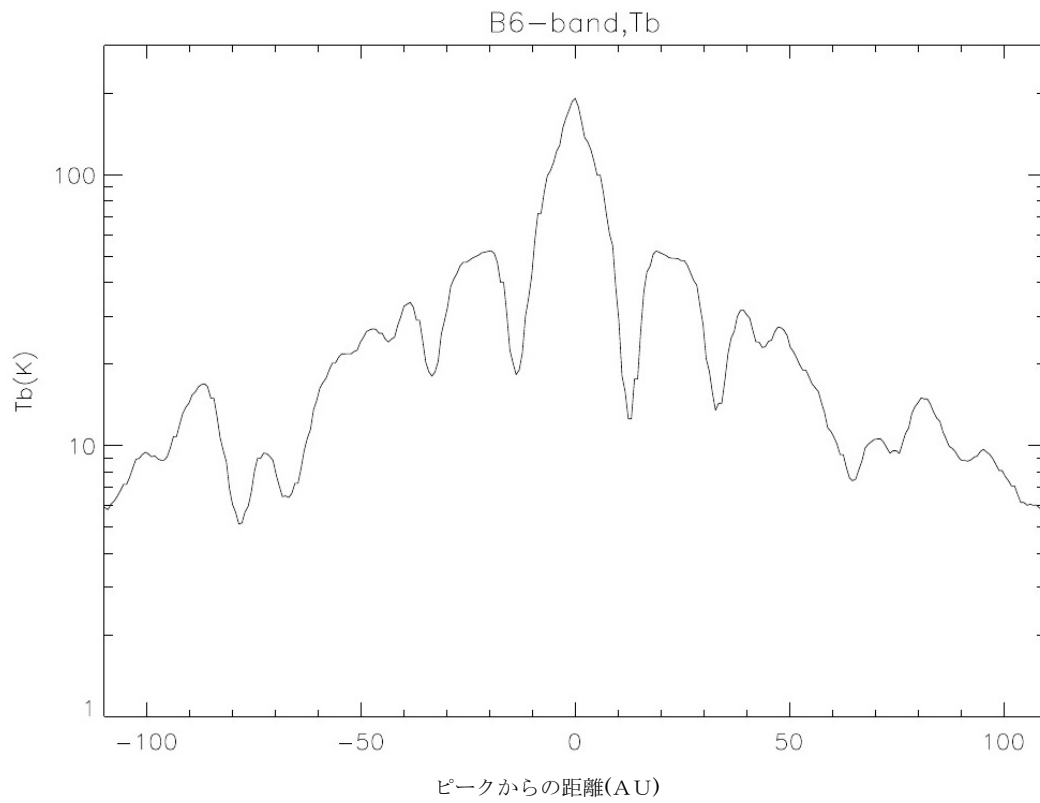


図 11 **Band6** の輝度温度

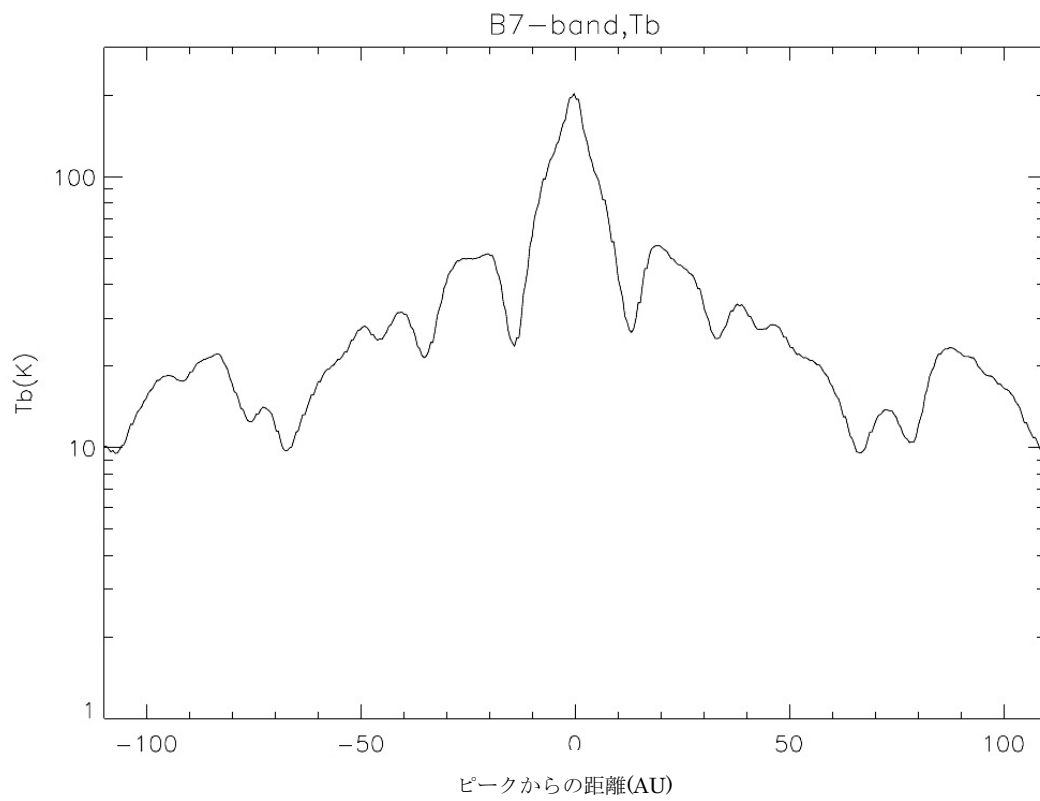


図 12 **Band7** の輝度温度

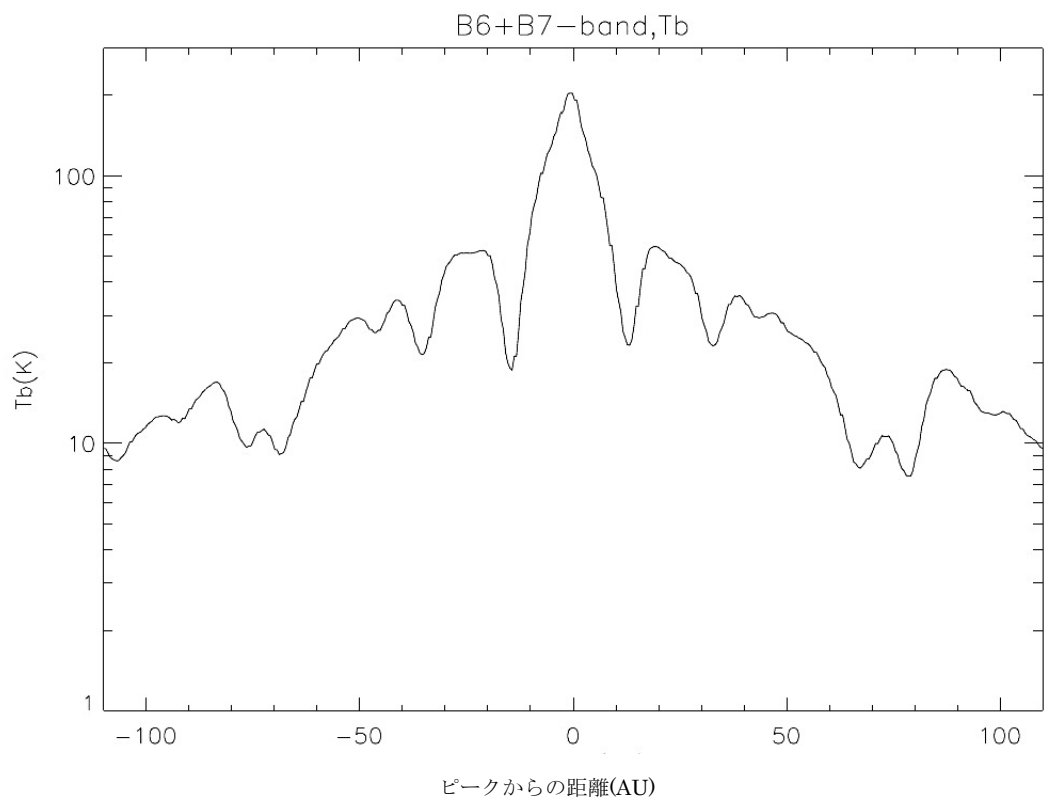


図 13 Band6+7 の輝度温度

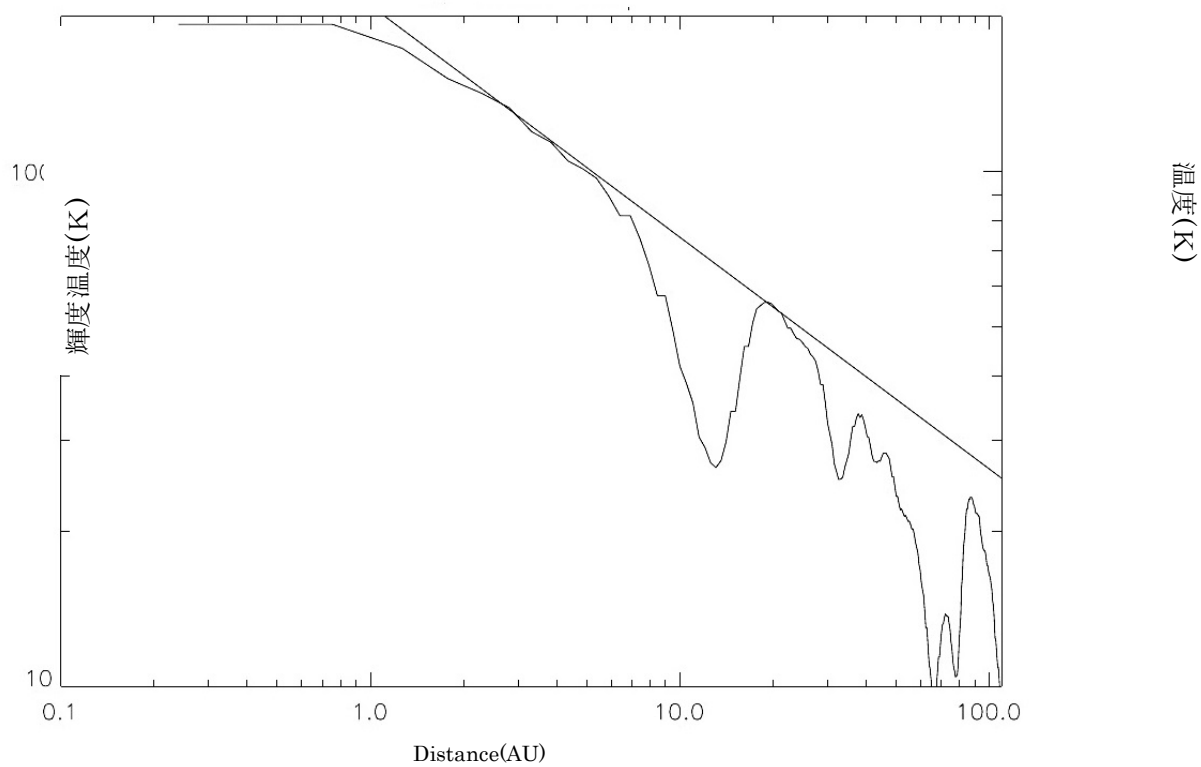


図 14 Band7 における輝度温度 T_b と温度 T

[3]物理量の導出

第2章 2-2 [3]より、はじめに Band7 の放射強度、平均周波数、プランクの放射強度を式 (5)、(8)に代入した。Band6+7 の各データも代入し、2つの式を連立させて β を導出した。

次に、同様の操作を Band7 と Band6 に対しても行った。ただし、放射強度については代入する前に単位変換を行っている(p.18 付録: 強度の単位変換)。

その結果推定されたスペクトル指数は、図 15、16 より、どちらの周波数帯でも 1~5 の範囲内でありピークの位置もほぼ一致した。

しかし図 15 は全体的に大きな値に偏っており、これは使用した周波数の平均が図 14 の場合と比べて小さいためであると考えられる。

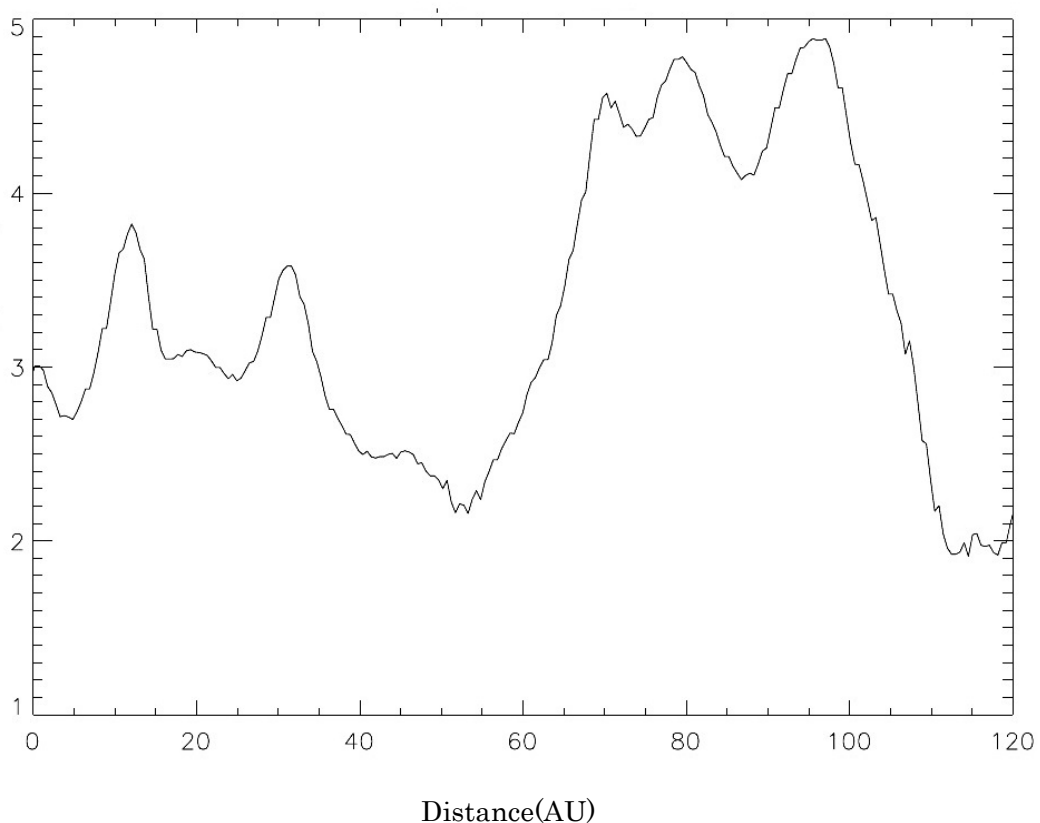


図 15 スペクトル指数(Band7,Band6+7)

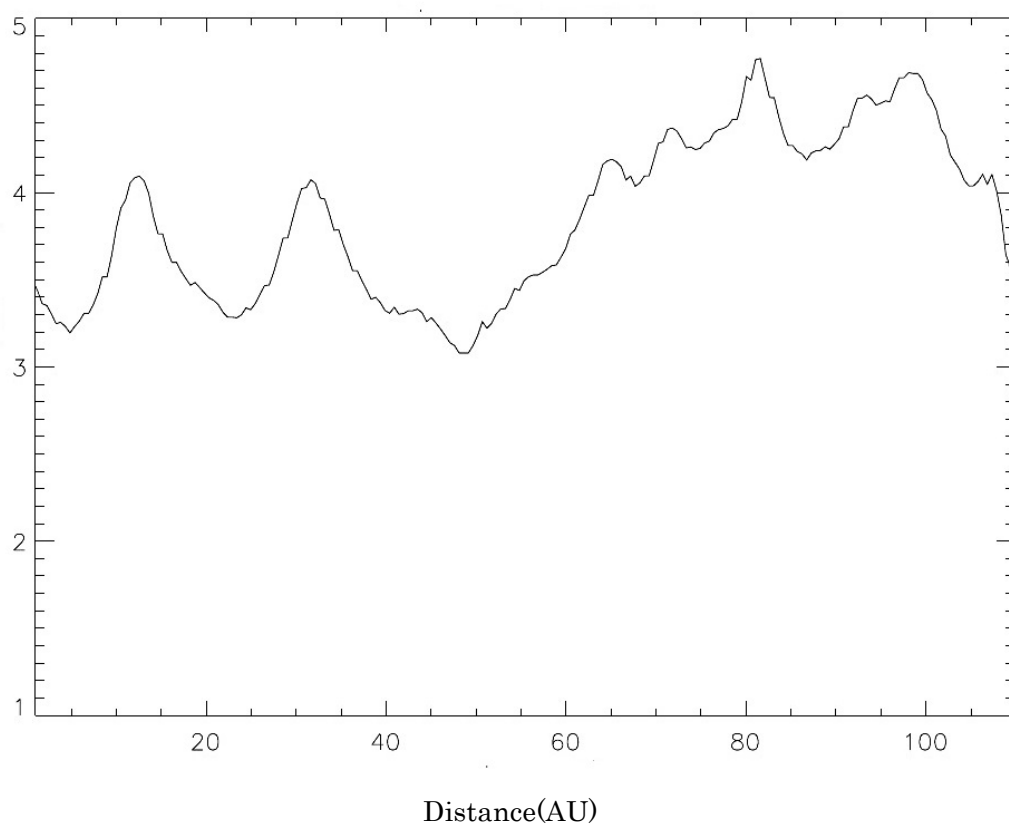


図 16 スペクトル指数(Band7,Band6)

得られた β の値を式(8)に代入して式(5)を解くことで、ダストの柱密度分布を求めた。

図 17、18 では、グラフ全体の分布の割合(グラフの形)としては一致しているように見える。しかし示す値には大きな差がある。これはそれぞれに対応するスペクトル指数の違いが影響していると考えられる。

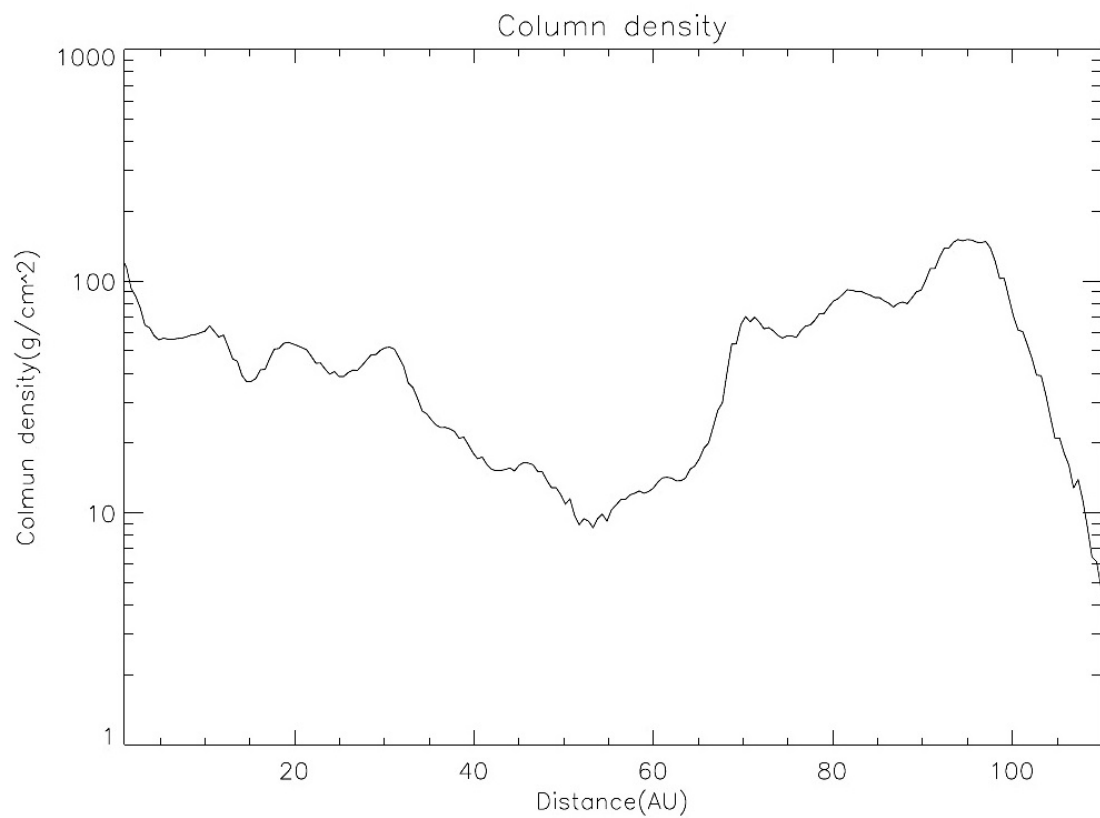


図 17 柱密度分布(Band7,Band6+7)

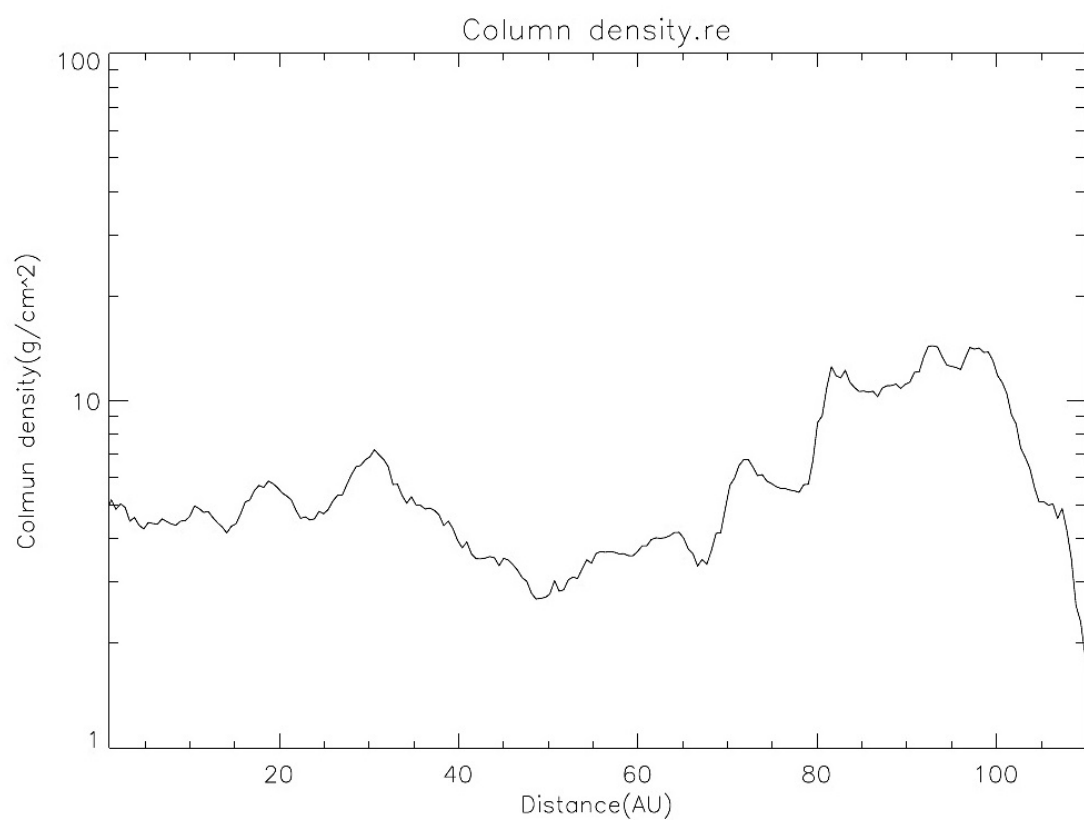


图 18 柱密度分布(Band7,Band6)

第 4 章 まとめ

- ・ 解析結果から、ダスト連続波放射強度、輝度温度、観測されたスペクトル指数の再現性は高く、先行研究とほぼ一致したと言える。

- ・ 輝度温度から仮定した温度分布を用いたスペクトル指数は、ピークの放射強度の小さい位置と一致していた。しかし光学的に薄い領域における温度の仮定が正確性を欠くため、先行研究で得られたようなシャープなグラフを描くことができなかった。

- ・ 観測量から物理量の導出を試みたものの、異なる周波数帯のデータを用いて結果を比較すると、スペクトル指数、柱密度分布ともに明らかな違いが見られた。理由としては、周波数の差、観測誤差、周波数帯ごとの角度分解能の違いによるデータの不確実性などが考えられる。

付録

・強度の単位変換

干渉計観測で得られる強度分布は、Jy/beam という単位で表されることが多い。beam とは合成ビームの立体角であり観測によって異なるので、合成ビームの大きさに依らない単位を考える。

はじめに、ビームの立体角を求める。クリーンビームは最大値が 1 のガウス関数で、半値幅を長軸と短軸でそれぞれ θ_{maj} 、 θ_{min} とする。ガウス関数の標準偏差 σ_{maj} 、 σ_{min} とは、

$$\theta_{maj} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma_{maj} \dots (A.1)$$

および

$$\theta_{min} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma_{min} \dots (A.2)$$

という関係だから、ビーム立体角は

$$\Omega_{beam} = 2\pi\sigma_{maj}\sigma_{min} = \frac{\pi}{4\ln 2}\theta_{maj}\theta_{min} \dots (A.3)$$

となる。

ビーム立体角の単位は sr で、半値幅の単位は rad である。天文学では arcsec あるいは mas 単位で半値幅が表示されることが多いから、 $1 \text{ rad} = 180 \times 3600 / \pi \text{ arcsec}$ という関係を用いて立体角を sr、半値幅を arcsec で表すと、

$$\left(\frac{\Omega_{beam}}{sr}\right) = 2.66326 \times 10^{-11} \left(\frac{\theta_{maj}}{arcsec}\right) \left(\frac{\theta_{min}}{arcsec}\right) \dots (A.4)$$

$F_\nu = \int I_\nu(\theta, \phi) \cos\theta d\Omega$ (F_ν : エネルギーフラックス密度) より、

$$\left(\frac{I_\nu}{Jy \text{ sr}^{-1}}\right) = 3.75479 \times 10^{10} \left(\frac{\theta_{maj}}{arcsec}\right)^{-1} \left(\frac{\theta_{min}}{arcsec}\right)^{-1} \left(\frac{F_\nu}{Jy \text{ beam}^{-1}}\right) \dots (A.5)$$

・輝度温度への換算

Jy beam⁻¹ の単位を輝度温度 K に換算する。 $T_b \equiv \frac{\lambda^2}{2k} I_\nu$ より、

$$\frac{T_b}{K} = 1.222 \times 10^6 \left(\frac{\theta_{maj}}{arcsec}\right)^{-1} \left(\frac{\theta_{min}}{arcsec}\right)^{-1} \left(\frac{\nu}{GHz}\right)^{-2} \left(\frac{F_\nu}{Jy \text{ beam}^{-1}}\right) \dots (B.1)$$

・ ALMA 望遠鏡

ALMA(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)は、直径 12m と 7m の計 66 台の電波望遠鏡を最大で 16km の範囲でさまざまに配置し、超高角度分解能を実現した電波干渉計である。2013 年に本格運用を開始してから、チリ・アタカマ砂漠の恵まれた観測環境(標高が高いこと、降水量が少ないことなど)を活かして画期的な成果を挙げている。

先行研究

- ・ ALMA Partnership, C.L. Brogan, L.M. Perez et al. 2015 July 20

参考文献

- ・ シリーズ現代の天文学 6 星間物質と星形成 日本評論社
福井康雄、犬塚修一郎、大西利和、中井真正、舞原俊憲、水野亮
- ・ シリーズ現代の天文学 16 宇宙の観測Ⅱ－電波天文学 日本評論社
中井直正、坪井昌人、福井康雄
- ・ C.Pinte, W.R.F.Dent et al. 2016 January 1
- ・ 高木達仁(2016) 卒業論文
- ・ 高原美汐(2016) 卒業論文