

卒業論文

ALMA 望遠鏡データに基づく HD142527 の
ダスト円盤の構造解析

2022 年度
(令和 4 年度)

茨城大学理学部理学科
学際理学コース

19S6029H

山本小百合

概要

本研究の目的は惑星形成の母胎と考えられる原始惑星系円盤の構造を探ることである。ALMA 望遠鏡で観測された HD142527 の band3(98.5GHz)と band7(322GHz)の2つの周波数のダスト連続波データを用いて解析を行い、観測データである放射輝度 I_ν から、光学的厚み τ 、ダストの質量吸収係数 κ_{abs} のスペクトル指数 β 、柱密度 Σ_d の円盤内の分布を求めた。柱密度 Σ_d の分布は温度の仮定方法の違いにより、先行研究と異なる部分があった。

目次

第 1 章	研究背景・目的	1
第 2 章	観測データ	2
第 3 章	解析方法	3
第 4 章	結果	5
第 5 章	考察	9
第 6 章	まとめ	10
謝辞		11
参考文献		12
付録 A	imsmooth	13
付録 B	imregrid	14

第1章 研究背景・目的

原始惑星系円盤は、若い星の周囲に付随する円盤である。原始惑星系円盤で惑星が形成されると考えられるため、円盤の構造を解析することは惑星形成過程を解明することに繋がる。ALMA(Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array)は、チリのアタカマ砂漠にある標高 5,000m の高原に位置する、アンテナ計 66 台からなる一つの巨大な電波望遠鏡を構成する干渉計である。ミリ波・サブミリ波領域を観測し、高い感度と解像度をもつ。

本研究では、過去に ALMA 望遠鏡で取得されたデータから作成された電波画像を使用してダスト円盤の構造解析を行う。対象天体である HD142527 は地球から 159pc [1]の距離にある原始惑星系円盤を伴う天体で、円盤の長軸は天球面で北から東方向に測られた位置角 P.A.=161°、視線に対する対称軸の傾斜角 $i = 27^\circ$ と導出されている[2]。本研究では、ALMA 望遠鏡で観測された2つの異なる周波数のダスト連続波の観測データから物理量を求め、ダスト円盤の構造を探ることを目的とする。

第2章 観測データ

本研究の対象天体は HD142527 である。解析には、ALMA 望遠鏡で取得された 2 つの周波数のダスト連続波の観測データを用いた。具体的には、2 つの先行研究[2], [3]により、生データであるビジビリティから作成され、それぞれの論文で示されていた画像データを用いた。各周波数の観測日やビームサイズ（空間分解能）等の情報を表 1 に示す。

表 1 観測データの情報

	データ 1 (Soon et al. (2019) [3]による)	データ 2 (Fukagawa et al. (2013) [2]による)
バンド名	band3	band7
周波数	98.5 GHz	322 GHz
波長	3.04 mm	0.931 mm
ビームサイズ	0.54"×0.44" (PA = 78°)	0.18"×0.13" (PA = 72°)
ピクセル数	4096×4096	2048×2048
観測コード	2011.0.00318S	2013.1.00670S
観測日	2012/06/01	2015/07/04

第3章 解析方法

第 2 章で示した 2 つの観測データを用いて物理量を求める。2 つの画像データはビームサイズとピクセル数がそれぞれ異なっていたため、揃えて比較できる形にする必要があった。そこで、ビームサイズとピクセル数を解析ソフトである CASA の imsmooth と imregrid (タスク名) を使用し、表 2 の値に揃えた。タスクの詳細は付録 A, B に記した。

表 2 変更後のデータの情報

	band3	band7
ビームサイズ	0.54"×0.44" (PA = 78°)	
ピクセル数	2048×2048	
Peak Intensity	1.15×10^{-2} Jy/beam (1070 σ)	3.66×10^{-1} Jy/beam (621 σ)
rms (円盤からの放射がない領域で の画像上の揺らぎ。 1rms を σ と表記。)	1.07×10^{-5} Jy/beam	5.89×10^{-4} Jy/beam

以下の式を用いて、光学的厚み τ 、ダストの質量吸収係数 κ_{abs} [cm²/g] のスペクトル指数 β 、柱密度 Σ_{d} [g/cm²] を求める。観測データから得られる観測量は放射輝度 I_{ν} [Jy/beam] である。ただし、 $B_{\nu}(T)$ はプランク関数である。

$$I_{\nu} = B_{\nu}(T)[1 - \exp(-\tau(\nu))] \quad (1)$$

$$\tau(\nu) = \kappa_{\text{abs}}(\nu) \Sigma_{\text{d}} \quad (2)$$

$$\kappa_{\text{abs}} = 10 \left(\frac{\nu}{10^{12} \text{ Hz}} \right)^{\beta} \quad (3)$$

式(1)は放射輸送方程式、式(2)は光学的厚み、式(3)は円盤に含まれるダストの質量吸収係数として広く使われている式である[4]。

本研究では2つの観測データから物理量を求めるため、温度 T [K] を仮定する必要がある。今回は、黒体の輻射平衡温度を採用した。仮定した温度分布を式(4)に示す。 L は天体の光度[5]、 σ_{SB} はステファン・ボルツマン定数である。

$$T(r) = \left(\frac{L}{16\pi\sigma_{\text{SB}}r^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

解析には Python を用いた。物理量を導出する手順は、まず、式(1)より 98.5GHz(band3) と 322GHz(band7) の光学的厚み τ を求めた。次に、98.5GHz と 322GHz の柱密度が等しいと仮定して、式(2)と式(3)を変形すると以下の式になる。

$$\beta = \frac{\log\left(\frac{\tau_{322\text{GHz}}}{\tau_{98.5\text{GHz}}}\right)}{\log\left(\frac{322\text{GHz}}{98.5\text{GHz}}\right)} \quad (5)$$

式(5)で求めた β を用いて、式(3)よりダストの質量吸収係数 κ_{abs} [cm²/g] を求め、最後に式(2)より柱密度 Σ_{d} [g/cm²] を求めた。

第4章 結果

放射輝度 I_ν の有意な値のみを使用するため、 3σ ($\sigma = 1\text{rms}$) 以下をカットした。カットした後のデータを 98.5GHz(band3)は図 1、322GHz(band7)は図 2 に示す。各図の左下はビームサイズを表す (他の図も同様)。

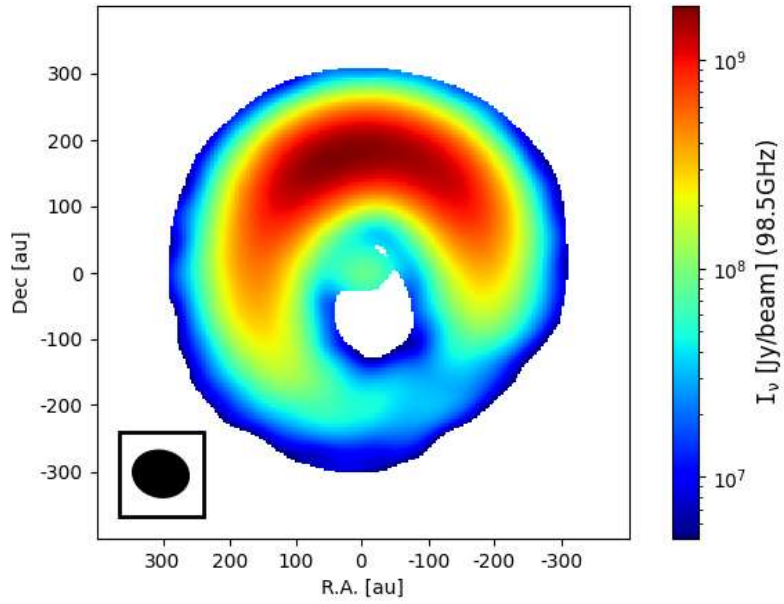


図 1 放射輝度 I_ν (98.5GHz)の分布図

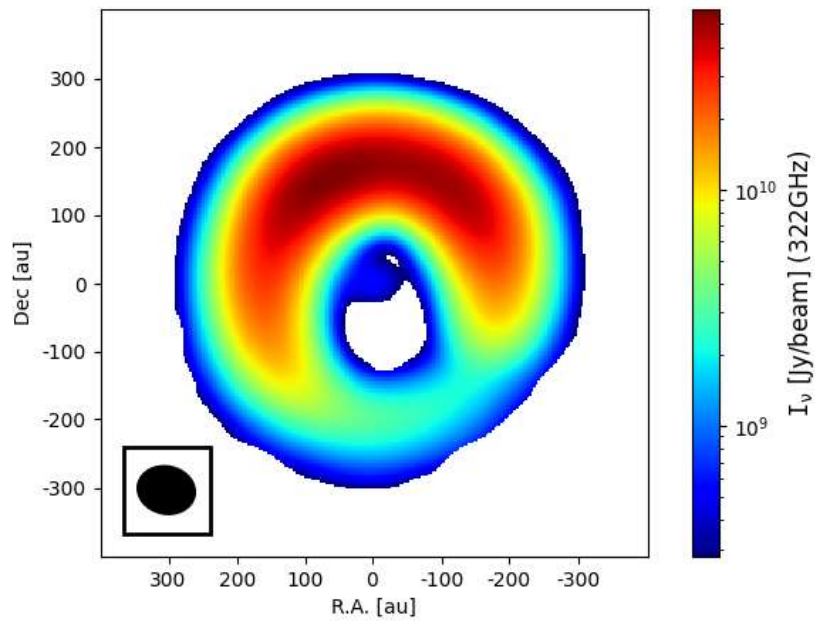


図 2 放射輝度 I_ν (322GHz)の分布図

式(1)より、98.5GHz と 322GHz の光学的厚み τ を求めた結果を図 3、図 4 に示す。
 98.5GHz では、南側より北側の方が大きい値だが、 $\tau \lesssim 0.18$ であるため円盤全体で光学的に薄いことがわかる。322GHz では $\tau \lesssim 0.80$ であり、円盤の北側で光学的に厚く、南側で薄くなっている。

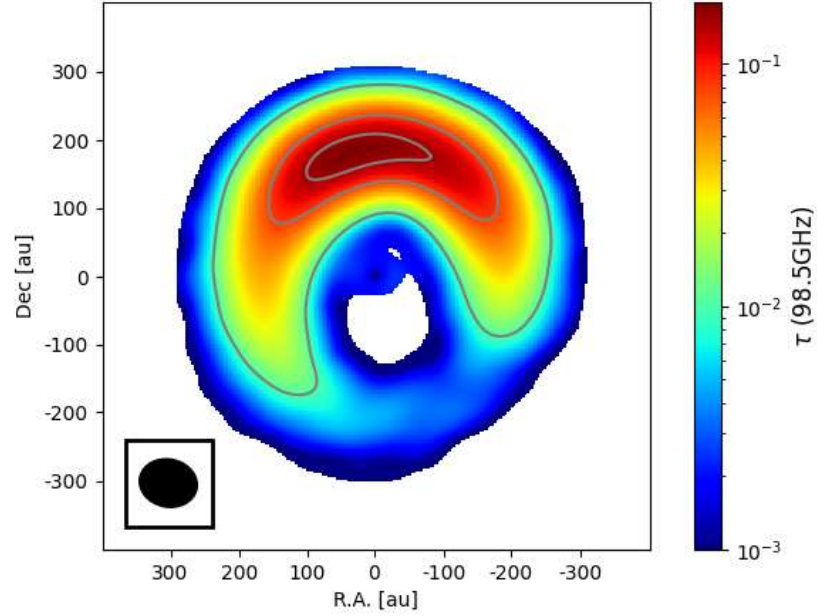


図 3 τ (98.5GHz)の分布図。等高線は外側から $\tau = 0.01, 0.08, 0.15$ 。

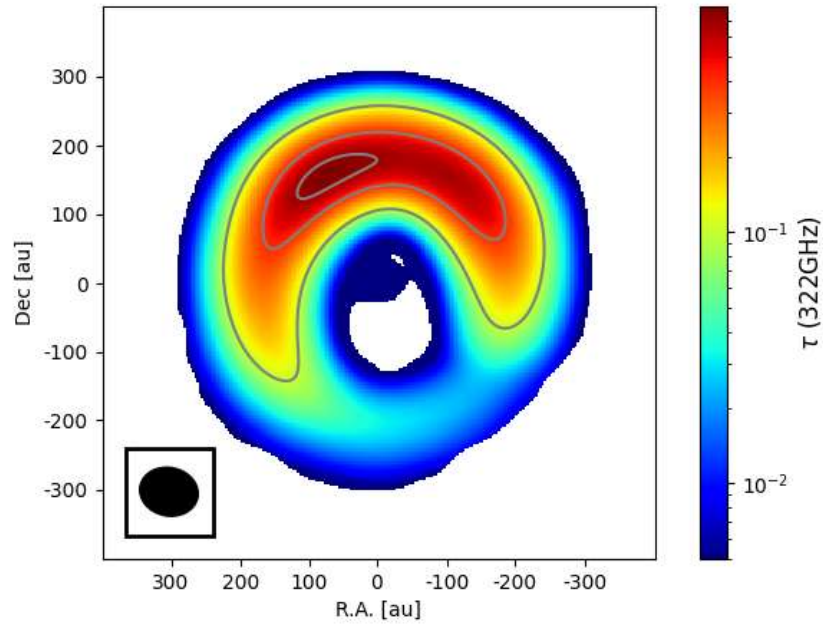


図 4 τ (322GHz)の分布図。等高線は外側から $\tau = 0.1, 0.4, 0.7$ 。

式(5)より、 κ_{abs} のスペクトル指数 β を求めた結果を図 5 に示す。円盤内で β の値は異なり、円盤の北側は β が小さく、南側は大きくなっている。

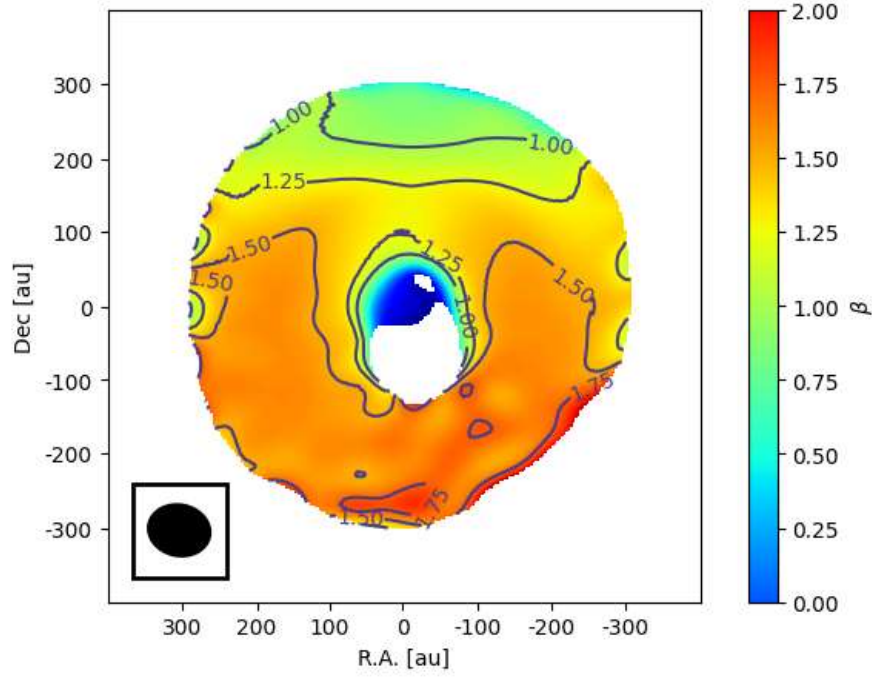


図 5 β の分布図

求めた τ 分布と β 分布を使用し、式(2)より柱密度 $\Sigma_d [\text{g}/\text{cm}^2]$ を求めた。その結果を図 6 に示す。円盤の北側で密度が高く、南側で低くなっている。柱密度のピークは $\Sigma_d \sim 0.37 [\text{g}/\text{cm}^2]$ であり、北東に位置する。

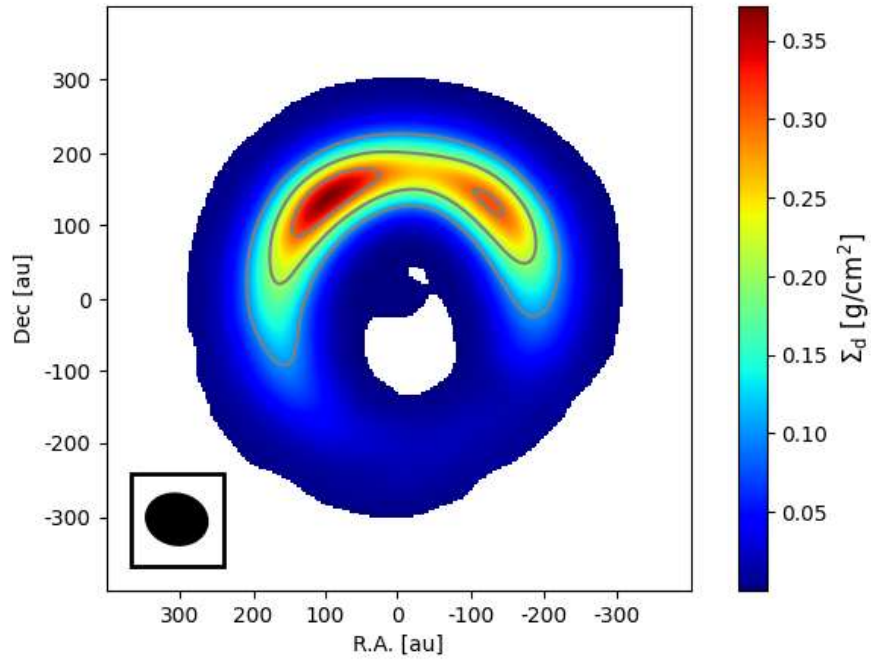


図 6 柱密度 Σ_d の分布図。等高線は外側から $\Sigma_d = 0.1, 0.2, 0.3 \text{ [g/cm}^2\text{]}$ 。

第5章 考察

波長に比べてダストのサイズが十分小さな範囲では、 β は 2 に近い値をとることが知られている。一方、ダストサイズが波長に対して十分大きくなると、質量当たりの表面積は小さくなることに伴い、質量当たりの吸収断面積である κ_{abs} は小さくなり、 β は 0 に近づく。円盤内のダストにはサイズ分布があるため、 κ_{abs} のスペクトル指数 β はダストの最大サイズを示す指標となり、ダストの最大サイズが大きいと β の値は小さく、ダストサイズが小さいと β の値は大きくなると考えられる。 β の分布図 (図 5) より、円盤の北側から南側に向かって β の値が大きくなっているため、ダストサイズは北側から南側に向かって小さくなると考えられる。

柱密度 Σ_d の分布図 (図 6) を先行研究 [3] の結果と比較すると、本研究では柱密度のピークである $\Sigma_d \sim 0.37 \text{ [g/cm}^2\text{]}$ は円盤の北東側にあるが、先行研究では円盤の北西側に位置する。ピークの位置が異なる理由として考えられることは、本研究では温度 T を黒体の輻射平衡温度で仮定したため、方位角方向に対称な温度分布となっているが、先行研究では ^{13}CO の $J=3-2$ が光学的に厚いことから、 ^{13}CO の $J=3-2$ の連続波を含めたピーク輝線強度を温度分布として仮定していたため、方位角方向に非対称であり、円盤の北東側の温度が高くなっている。そのため、柱密度は小さくなりピークの位置が異なっていると考えられる。

本研究ではダスト円盤の温度 T を黒体の輻射平衡温度で仮定したため、周りのダストによる影響は考慮されず、天体の光度と中心からの距離のみで温度が決まる。そのため、実際の温度より高く仮定しているため、得られた柱密度 Σ_d の値は下限値と考えられる。

第6章 まとめ

本研究では、ALMA 望遠鏡の band3(98.5GHz)と band7(322GHz)の2つの周波数で観測された HD142527 のダスト連続波データを使用し、物理量を求めてダスト円盤の構造を解析した。観測データである放射輝度 I_ν から、光学的厚み τ 、 κ_{abs} のスペクトル指数 β 、柱密度 Σ_d の円盤内の分布を求めた。柱密度 Σ_d の分布では温度の仮定方法の違いから先行研究と異なる結果があったが、本研究の仮定である黒体の輻射平衡温度で温度を仮定すると柱密度 Σ_d の値は下限値と考えられる。

また、ダストの波長依存性からダストの散乱の寄与を無視できるとして、吸収のみを考えていたが、ダストの成長によりダストサイズが大きくなるとダストの散乱を考慮する必要がある。温度に対する仮定が柱密度の導出結果に及ぼす影響を踏まえて、より適切な温度分布を決定することが必要である。

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の基礎や研究の進め方等、終始丁寧なご指導と助言をいただき深く感謝いたします。米倉覚則教授にはゼミ等でご指導いただきました。また、研究室の先輩である折原龍太さんには解析の方法等、多くの助言をいただきました。疑問に対して丁寧にわかりやすく教えていただき厚くお礼申し上げます。研究室の先輩方や同期の皆様にも支えていただきました。関わってくださった皆様に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, et al. 2022, A&A, Forthcoming article
- [2] Fukagawa, M. et al., 2013, PASJ 65, L14.
- [3] Soon, K.-L. et al., 2019, PASJ, 111.
- [4] Beckwith et al. 1990, AJ, 99, 924
- [5] Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2018, A&A, 616, A1

付録 A imsmooth

imsmooth は 2 つのデータのビームサイズを合わせる CASA のタスクである。

imagename はビームサイズを変更するファイル名、targetres は True を入力する。major、minor、pa は合わせたい方のビームサイズの長軸、短軸、position angle を入力する。region は範囲で、入力しなければ全範囲となる。outfile は新しく作られるファイル名を入力する。

```
# imsmooth :: Smooth an image or portion of an image
imagename      = 'hd142527_cont_b7_cycle1.fits' # Name of the input image. Must be
                                                    # specified.
kernel         = 'gauss'                        # Type of kernel to use. Acceptable values are
                                                    # "b", "box", or "boxcar" for a boxcar kernel,
                                                    # "g", "gauss", or "gaussian" for a gaussian
                                                    # kernel, "c", "common", or "commonbeam" to use
                                                    # the common beam of an image with multiple
                                                    # beams as the gaussian to which to convolve all
                                                    # the planes, "i" or "image" to use an image as
                                                    # the kernel.
beam           = ''                            # Alternate way of describing a Gaussian. If
                                                    # specified, must be a dictionary with keys
                                                    # "major", "minor", and "pa" (or
                                                    # "positionangle"). Do not specify beam if
                                                    # specifying major, minor, and pa.
targetres      = True                          # If gaussian kernel, specified parameters are to
                                                    # be resolution of output image (True) or
                                                    # parameters of gaussian to convolve with input
                                                    # image (False).
major          = '0.536871arcsec'              # Major axis for the kernels. Standard quantity
                                                    # representation. Must be specified for
                                                    # kernel="boxcar".
minor          = '0.441749arcsec'              # Minor axis. Standard quantity representation.
                                                    # Must be specified for kernel="boxcar".
pa             = '78.1222deg'                  # Position angle used only for gaussian kernel.
                                                    # Standard quantity representation.
region         = ''                            # Region selection. Default is to use the full
                                                    # image.
box            = ''                            # Rectangular region to select in direction
                                                    # plane. Default is to use the entire direction
                                                    # plane.
chans          = ''                            # Channels to use. Default is to use all
                                                    # channels.
stokes         = ''                            # Stokes planes to use. Default is to use all
                                                    # Stokes planes.
mask           = ''                            # Mask to use. Default is none.
outfile        = 'hd142527_cont_b7_cycle1_test.fits' # Output image name. Must be
                                                    # specified.
overwrite      = True                          # If true, overwrite (unprompted) pre-existing
                                                    # output file.
```

付録 B imregrid

imregrid は 2 つのデータのピクセル数を合わせる CASA のタスクである。

imagename にはピクセル数を変更するファイル名、template にはピクセル数を合わせた元となるファイル名、output には新しく作られるファイル名を入力する。

```
# imregrid :: regrid an image onto a template image
imagename      = 'continuum_99GHz_pcal4_acal_briggs05.fits' # Name of the source
                                                         # image
template       = 'hdi42527_cont_b7_cycle1_test.image/' # A dictionary, refcode, or
                                                         # name of an image that provides the output
                                                         # shape and coordinate system
shape          = [-1] # Shape of the output image. Only used if
                       # template is an image. If not specified (-1),
                       # the output image shape will be the same as the
                       # template image shape along the axes that are
                       # regridded and the same as input image shape
                       # along the axes which are not regridded.

output         = 'continuum_99GHz_pcal4_acal_briggs05.pix.image' # Name for the
                                                         # regridded image
asvelocity     = True # Regrid spectral axis in velocity space rather
                       # than frequency space?
axes           = [-1] # The pixel axes to regrid. -1 => all.
interpolation  = 'linear' # The interpolation method. One of "nearest",
                           # "linear", "cubic".
decimate       = 10 # Decimation factor for coordinate grid
                # computation
replicate      = False # Replicate image rather than regrid?
overwrite      = True # Overwrite (unprompted) pre-existing output
                       # file?
```