

修士学位論文

少数基線VLBI観測による
6.7GHzメタノールメーザー源の
放射領域サイズ変動の研究

2018年度
(平成30年度)

茨城大学大学院理工学研究科

理学専攻

17NM153T

齋藤偉

要旨

大質量星形成領域に付随する6.7GHzメタノールメーザーはこれまで1000天体以上で観測されている。その中には周期的・突発的に強度変動を起こす天体も発見されている。このような強度変動のメカニズムについてはこれまでさまざま研究が行われているが、数日の期間で数百倍の強度まで上昇するメカニズムを説明することは難しい。そこで本研究では、新たな放射変動メカニズムとして「メタノールメーザースポットの放射領域サイズの変化」に焦点を当てる。

本研究の目的は、メタノールメーザーの強度変動を放射領域サイズの変化という観点から解明することである。そのために複数の基線の干渉計を用いて観測を行い、基線長に対する観測される強度の違いから天体の放射領域サイズを捉える。さらに静穏期、増光期の両時期に観測を行い、放射領域サイズと時期の相関関係について調査する。放射領域のサイズに関する先行研究としてはMinier et al. (2002)があげられる。これによると、スポットは中心に存在する不飽和領域であるcoreとその周囲を取り囲む飽和領域であるhaloの二成分で構成されることが観測的に考察されている。本研究ではメタノールメーザーの強度変動がcoreの拡大による現象であると仮定し、そのサイズ変化を捉えることによる検証を目標とした。

研究方法としては、メタノールメーザー源に対して複数の基線によるVLBI観測を行い、観測強度の違いを利用する。観測には機動性が必要となるため日本のVLBI観測網のうち、日立局(32m)、高萩局(32m)、鹿島局(34m)、山口第一局(32m)の四局を用いた「少数基線VLBI観測」を行なった。その後、観測で得られたfluxに相当するvisibilityと基線長に相当するuv-distanceをパラメーターとしたvisibility-plotを作成することでサイズ推定を行った。さらに今後、静穏期と増光期で観測を行えば放射領域サイズの変化を捉えることが可能になる。

解析にはNICTの開発したK5/VSSP32サンプラーを使用し、同じくNICTで開発された関連処理ソフトを用いて各局の自己相関スペクトル、各基線の相互相関スペクトルを取得した。uv-distanceの導出、visibility-plotの作成、fittingにはpython言語で作成したプログラムを用いた。自己相関スペクトルでメーザー放射が検出されなかった4天体を除外した残りの52天体についてvisibility-plotを作成した。Visibility-plotに対してはgauss functionとsinc functionでフィッティングを行った。その結果、haloのサイズを推定することができたのは30天体であった。観測天体までの距離が不明な9天体、fittingができなかった13天体に関してはサイズ推定の際に除外した。Gaussian fittingによって推定したhaloのサイズは、 $\mathcal{O}(1\text{au})$ から $\mathcal{O}(1000\text{au})$ に分布していることがわかった。一方、coreのサイズについては上限値を推定することができ、 $\mathcal{O}(100\text{au})$ 以下ということがわかった。これらの結果はMinier et al. (2002)で議論されているcore, haloのサイズとオーダー[au]が一致していることから、スポットサイズの推定方法を確立することができた。天体の構造については、visibility-plotがガウシアンでよくfittingできることから天体の輝度分布はgaussianであると考えられる。

Abstract

Class II 6.7 GHz methanol maser is exclusively associated with high-mass star forming regions. More than one thousand sources are detected, and more than forty sources show periodic variation in their flux density over time. The pattern of the periodic flux variability is classified into two types, one that shows a sinusoidal-like pattern, and the other that shows a flare during a period of quiescent phase. While theories can explain the patterns of the flux variation, there is currently no explanation to the increase of flux density of over a factor of 100, which is most frequently seen in the flaring maser sources.

I propose that the flaring of the maser flux density may be due to the increasing size of a maser spot. If the size of the maser spot increases, the observed flux density also increases. In this study, I aim at investigating the size of the maser spots using the UV-visibility plot obtained with VLBI observations. This can be done by observing the maser spots twice: one at the quiescent period and the other at its flaring period. If the maser spot size increases, one would see a relative decrease of the visibility obtained with long baselines that spatially resolve the maser spots.

We performed VLBI observations towards 56 maser sources using four radio telescopes: the Hitachi 32m, Takahagi 32m, Kashima 34m, and Yamaguchi 32m telescopes. The baseline range is about 0.3 km to 850 km. The sample is selected based on monitoring observations with the Hitachi 32m telescope.

A total of 52 sources are detected, and I created UV-visibility plot to these sources. I fitted the UV-visibility plot with a gaussian/sinc function, and found that the average maser spot size of halo is 438.23 ± 42.71 au. This result is consistent with the size of estimation of the core and halo in Minier et al. (2002).

目次

第1章	序論	1
1.1	大質量星形成領域	1
1.2	レーザー	1
1.2.1	レーザーの性質	1
1.2.2	メタノールレーザー	5
1.3	観測装置	6
1.3.1	単一鏡(Single dish)	6
1.3.2	干渉計(Interferometer)	7
第2章	研究背景,目的	10
2.1	研究背景	10
2.1.1	メタノールレーザーの強度変動	10
2.1.2	メタノールレーザー源の放射領域サイズ	12
2.2	研究目的	14
第3章	研究手法	15
3.1	放射領域サイズの推定	15
3.1.1	空間周波数とuv-distance	15
3.1.2	ビジビリティと輝度分布	17
3.1.3	visibility-plotを用いた放射領域サイズの推定	17
3.2	放射領域サイズ変化の推定	18
第4章	観測と解析	20
4.1	観測諸元	20
4.1.1	アンテナ	20
4.1.2	サンプラー	21
4.1.3	観測対象天体(メタノールレーザー源)	21
4.1.4	キャリブレーター	23
4.1.5	観測諸元のまとめ	24
4.2	相関処理	24
第5章	結果・考察	26
5.1	各パラメータの最適値の決定	26
5.1.1	積分時間と信号雑音比の評価	26
5.1.2	t1ppとSNR	27

5.1.3	幾何学的遅延時間	28
5.1.4	バンドパス	30
5.2	メタノールメーザー天体の解析結果	32
5.2.1	09.62+0.196	32
	キャリブレーション1: bandpass	35
	キャリブレーション2: baseline-fit	36
	相互相関振幅値のキャリブレーション	37
	uv-distanceの計算	38
	Visibility-plotの作成	38
	放射領域サイズの計算	40
5.2.2	10.205 − 0.345	42
5.2.3	10.287 − 0.125	43
5.2.4	10.323 − 0.160	44
5.2.5	10.320 − 0.259	45
5.2.6	11.109 − 0.114	45
5.2.7	111.24 − 0.76	46
5.2.8	111.53 + 0.76	46
5.2.9	12.025 − 0.031	47
5.2.10	12.625 − 0.017	48
5.2.11	121.28 + 0.65	48
5.2.12	123.05 − 6.31	49
5.2.13	13.657 − 0.599	50
5.2.14	14.631 − 0.577	50
5.2.15	18.341 + 1.768	51
5.2.16	19.755 − 0.128	51
5.2.17	192.60 − 0.05	52
5.2.18	23.19 − 0.38	53
5.2.19	24.93 + 0.08	53
5.2.20	25.38 − 0.18	54
5.2.21	25.41 + 0.10	54
5.2.22	25.65 + 1.04	55
5.2.23	25.82 − 0.17	56
5.2.24	26.52 − 0.26	56
5.2.25	27.22 + 0.13	57
5.2.26	32.03 + 0.06	57
5.2.27	33.64 − 0.21	58
5.2.28	35.02 + 0.35	59
5.2.29	35.20 − 0.74	59
5.2.30	35.20 − 1.74	60
5.2.31	35.79 − 0.17	60

5.2.32	$351.775 - 0.536$	61
5.2.33	$36.10 + 0.56$	62
5.2.34	$37.40 + 1.52$	62
5.2.35	$38.26 - 0.08$	63
5.2.36	$43.87 - 0.77$	63
5.2.37	$45.44 + 0.07$	64
5.2.38	$52.20 + 07$	64
5.2.39	$69.52 - 0.97$	65
5.2.40	$07.632 - 0.109$	66
5.2.41	$08.139 + 0.226$	66
5.2.42	$94.58 - 1.794$	67
5.2.43	IRS22198	67
第6章	まとめ	73
参考文献		75
付録A	相関処理によって求められた遅延残差, 残差変化率,SNR	77
付録B	キャリブレーションのclean-map,visibility-map	83
付録C	日立32m単一鏡観測によるスペクトル	87
付録D	観測された周波数とLSR速度との変換	95
付録E	visibility-plot	96
付録F	相互相関関数のキャリブレーション	103

第1章

序論

1.1 大質量星形成領域

電波天文学における重要なテーマの一つとして星間空間における大質量星形成過程の解明が挙げられる。小質量星の形成過程は中心星にガスなどが落ち込み、その後周囲のガスなどを吹き飛ばすといったように進化段階が解明されている(Arce et al. 2007)。一方、大質量星は宇宙空間でも遠方に存在し直接観測することが困難であり、さらにその候補天体数も少ないことから多くの謎が残っている。この形成過程を解明できれば宇宙や銀河の成り立ちを研究する上で役立つことが期待できる。一般的に大質量星とは太陽の8倍以上の質量; $8M_{\odot}^{*1}$ を持つ星のことを指す。もし仮に小質量星形成と同様に分子雲コアの内部に原始星が生成され質量降着が起こるならば、初期段階では質量増加のタイムスケールと中心星の収縮タイムスケールでは前者の方がきくことになる。質量が増すとタイムスケールが逆転し、降着を続けながら主系列星になる。その後も大質量星は降着によって質量を増していき、数 $10 - 100M_{\odot}$ の大質量星を形成すると考えたときには問題が生じる。例えば、中心星の質量が約 $8M_{\odot}$ になると、中心星は主系列星となるため輻射圧の影響をうけ質量降着が妨げられる、などである。

このように、小質量星の進化過程を単に延長するだけでは大質量星の形成は説明できない。

1.2 メーザー

1.2.1 メーザーの性質

粒子数密度の低い宇宙空間においては、衝突による熱平衡状態が実現されず、自発放射や誘導放射・吸収過程が卓越するため準位が低い状態の粒子数よりも準位が高い状態の粒子数の方が多くなることがある。このような分布状態を反転分布といい、この反転領域に外部から粒子が入射することで高い準位から低い準位に向けての分子遷移が誘発される。これをきっかけとしカスケード状に遷移が起きることによって増幅されたエネルギーが地球上で強い電波放射として観測される。これをメーザー放射(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation ; maser)という。

メーザー放射の特徴としてあげられることは

- (1)メーザー放射を行うスポット本体はほとんど広がりをもたない点源である
- (2)メーザースポットが群生することでクラスター状の分布を形成することがある
- (3)直線偏波もしくは円偏波していることがある

*1 $1M_{\odot} = 1.9884 \times 10^{30}\text{kg}$

などがある。

レーザー放射の具体的な放射機構についても研究が進められている。ここからはミクロな領域で起きている分子遷移とレーザー放射を起こすのに必要な反転分布、その維持メカニズムである pumping という機構について説明する。

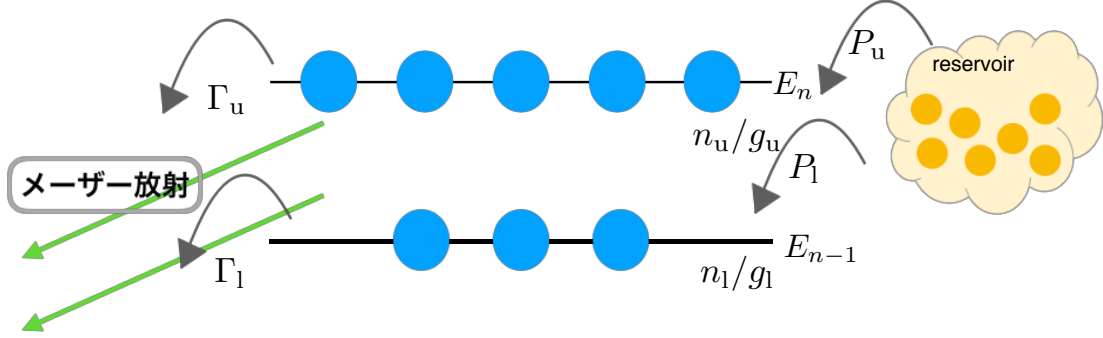


図1.1 レーザー放射のイメージ図

上記したようにレーザー放射を起こすには反転分布という分布状態を引き起こす必要がある。いまは簡単な状況として二準位間における粒子の分布状態を考える。反転分布が起きているとき、準位間の関係は以下のように書くことができる。

$$\frac{n_u}{n_l} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T_{\text{ex}}}\right) \quad (1.1)$$

n_u, n_l : 上と下の準位における粒子数密度

g_u, g_l : 上と下の準位における縮退度

ΔE : 準位間の遷移エネルギー

T_{ex} : 励起温度

k_B : ボルツマン定数

反転分布が起きている状況では、 $n_u/g_u > n_l/g_l$ という関係が成り立つ。反転分布を維持するためには、常に上の準位に存在する粒子を多くする必要がありそのために粒子を励起する pumping というメカニズムが必要となる。この pumping を説明するため理想的な状況として粒子が無限に存在している reservoir を仮定し、その reservoir から上の準位への単位時間での pump rate を P_u 、下の準位への rate を P_l とする。同様にそれぞれの準位から出ていく割合を Γ_u, Γ_l とすると単位体積あたりの減少率は $n_u \Gamma_u$ と $n_l \Gamma_l$ と書くことができる。バックグラウンドに存在するガスの数密度を n_{tot} 、衝突励起係数と衝突脱励起係数をそれぞれ γ_{lu}, γ_{ul} 、平均輻射強度を $\bar{J} = I \Delta \Omega / 4\pi$ として定常状態における各準位は以下ようになる。

$$0 = P_u - n_u \Gamma_u - (n_u B_{ul} - n_l B_{lu}) \bar{J} - (n_u \gamma_{ul} - n_l \gamma_{lu}) n_{\text{tot}} - n_u A_{ul} \quad (1.2)$$

$$0 = P_l - n_l \Gamma_l + (n_u B_{ul} - n_l B_{lu}) \bar{J} + (n_u \gamma_{ul} - n_l \gamma_{lu}) n_{\text{tot}} + n_u A_{ul} \quad (1.3)$$

A_{ul}, B_{ul} はそれぞれアインシュタイン係数であり、以下の関係が成り立つ。

$$A_{ul} = \frac{2h\nu_0^3}{c^2} B_{ul} \quad (1.4)$$

$$g_l B_{lu} = g_u B_{ul} \quad (1.5)$$

γ_{lu} と γ_{ul} の間にも以下の関係式がある。

$$\frac{\gamma_{lu}}{\gamma_{ul}} = \frac{g_u}{g_l} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T_{\text{kin}}}\right) \quad (1.6)$$

さらに $T_o(\equiv \Delta E/k_B) \ll T_{\text{kin}}$ であることから $\gamma_{ul}g_u \approx \gamma_{lu}g_l$ と書くことができる。これらを使って式(1.2)(1.3)を書き直すと以下ようになる。

$$0 = P_u - n_u \Gamma_u - (n_u - n_l g_u/g_l)(B_{ul}\bar{J} + \gamma_{ul}n_{\text{tot}}) - n_u A_{ul} \quad (1.7)$$

$$0 = P_l - n_l \Gamma_l + (n_u - n_l g_u/g_l)(B_{ul}\bar{J} + \gamma_{ul}n_{\text{tot}}) + n_u A_{ul} \quad (1.8)$$

ここで計算を簡単にするために二つの仮定をおく。

1. 自発放射の項は十分小さいとして無視する

2. 二つの準位間における減少率は同じとする($\Gamma_u = \Gamma_l \equiv \Gamma$)

この仮定のもとで二つの式を粒子数について解くと以下ようになる。

$$n_u = \frac{(P_u - P_l) + (P_u + P_l)[1 + (2g_u/g_l)(B_{ul}\bar{J} + \gamma_{ul}n_{\text{tot}})/\Gamma]}{2\Gamma + 2(1 + g_u/g_l)(B_{ul}\bar{J} + \gamma_{ul}n_{\text{tot}})} \quad (1.9)$$

$$n_l = \frac{(P_u + P_l)[1 + 2(B_{ul}\bar{J} + \gamma_{ul}n_{\text{tot}})/\Gamma] - (P_u - P_l)}{2\Gamma + 2(1 + g_u/g_l)(B_{ul}\bar{J} + \gamma_{ul}n_{\text{tot}})} \quad (1.10)$$

ここで Δn を定義することで反転分布の状態をわかりやすくすることができる。

$$\Delta n \equiv n_u/g_u - n_l/g_l \quad (1.11)$$

$$= \frac{P_u/g_u - P_l/g_l}{\Gamma + (1 + g_u/g_l)(B_{ul}\bar{J} + \gamma_{ul}n_{\text{tot}})} \quad (1.12)$$

この式の意味は「反転分布を維持するには上準位の単位準位あたりのポンプ率が下準位よりも高い^{*1}必要がある」ということである。ここでpump rateと密度の比について解くと、以下ようになる。

$$\Delta n^\circ \equiv n_u^\circ/g_u - n_l^\circ/g_l \quad (1.13)$$

$$= \frac{P_u/g_u - P_l/g_l}{\Gamma + (1 + g_u/g_l)\gamma_{ul}n_{\text{tot}}} \quad (1.14)$$

n_u°, n_l° は $\bar{J} = 0$ で得られる準位分布である。反転分布は輻射場がないときでも存在することがわかる。さらに式(1.12)(1.14)を組み合わせると以下のようにかける。

$$\Delta n = \frac{\Delta n^\circ}{1 + \bar{J}/\bar{J}_s} \quad (1.15)$$

この式と(1.13)(1.14)を用いると自己平均強度は以下のようにかける。

$$\bar{J}_s \equiv \frac{\Gamma + (1 + g_u/g_l)\gamma_{ul}n_{\text{tot}}}{(1 + g_u/g_l)B_{ul}} \quad (1.16)$$

式(1.15)から $\bar{J} < \bar{J}_s$ のとき、輻射強度は Δn に影響しないということがわかる。一方でもし、 $\bar{J}$ が $\bar{J}_s$ を大きく超えて増幅したとき、分布差は大きく減少する。しかし上の準位からの誘導放射を通して $\bar{J}$ が増加するということがまた重要である。このように $\bar{J}$ によって準位間の分布差が決められることをメーザー増幅の自己限界プロセス(self-limiting process)といい、メーザー放射の強度を考える上で重要な指標のひとつである。

^{*1} $P_u/g_u > P_l/g_l$

ここからは上で求めた平均強度 $\bar{J}$ を用いて、メーザー放射領域の状態と強度を関連させて考えていく。まず放射と吸収を考慮した場合の輸送方程式を考えると以下ようになる。

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + j_\nu \quad (1.17)$$

また放射係数と吸収係数に関しては以下の式が成り立つ。

$$j_\nu = \frac{h\nu_o}{4\pi} n_u A_{ul} \phi(\nu) \quad (1.18)$$

$$\alpha_\nu = \frac{h\nu_o}{4\pi} (n_l B_{lu} - n_u B_{ul}) \phi(\nu) \quad (1.19)$$

これらの式を用いて輸送方程式を書き直すと以下になる。

$$\frac{dI_\nu}{ds} = \frac{h\nu_o}{4\pi} \Delta n g_u B_{ul} \phi(\nu) I_\nu + \frac{h\nu_o}{4\pi} n_u A_{ul} \phi(\nu) \quad (1.20)$$

ただし ν_o は中心周波数である。 $\phi(\nu)$ は各周波数で分子が放出または吸収する光子の数に比例する標準プロファイル関数である。 $\phi(\nu)$ は周囲がガス温度と等しいときドップラープロファイルと考えることができ、以下のようにかける。

$$\phi(\nu_o) = \frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta\nu_D} \quad (1.21)$$

$\Delta\nu_D$ はドップラー幅とする。より一般的にするために式(1.20)を周波数に関して積分し、 $I \equiv \int I_\nu \phi(\nu) d\nu$ を定義すると輸送方程式は以下ようになる。

$$\frac{dI}{ds} = \frac{h\nu_o \Delta n^o g_u B_{ul}}{4\pi \Delta\nu (1 + \bar{J}/\bar{J}_s)} I + \frac{h\nu_o n_u A_{ul}}{4\pi \Delta\nu} \quad (1.22)$$

メーザー放射に関する有効バンド幅 $\Delta\nu$ を以下のように定義する。

$$\Delta\nu \equiv \frac{\int I_\nu d\nu}{I} \quad (1.23)$$

ここで任意の距離 s における強度 $I(s)$ を考えるために、メーザーのスポットサイズ中では輻射はビーミングの影響をうけると仮定し、 $J_\nu = I_\nu \Delta\Omega/4\pi$ と定義する。 $\Delta\Omega$ は微小立体角とする。

このとき平均強度とインテンシティの関係は以下のように書くことができる。

$$\frac{\bar{J}}{\bar{J}_s} = \frac{I}{I_s} \quad (1.24)$$

ただし、 $I_s \equiv 4\pi \bar{J}_s / \Delta\Omega$ とする。

さらに、式(1.22)の右辺は自発放射の効果を表していることから $I=0$ における分布を n_u^o として、輸送方程式は以下のように書き直せる。

$$\frac{dI}{ds} = \frac{I}{L(1 + I/I_s)} + \beta \frac{I_s}{L} \quad (1.25)$$

L を無飽和成長幅といい以下のように表される。

$$L \equiv \frac{4\pi \Delta\nu}{h\nu_o \Delta n^o g_u B_{ul}} \quad (1.26)$$

$$\beta \equiv \frac{n_u^o}{g_u \Delta n^o} \left(\frac{\Delta\Omega}{4\pi} \right) \frac{A_{ul}}{B_{ul} \bar{J}_s} \quad (1.27)$$

$n_u^o/g_u \Delta n^o$ はメーザー放射によって準位内の分布が変わるかどうかの指標と考えられる。

現実的なpumpingモデルにおいては、係数 β は1より小さい値にならないことも明らかになっている。

式(1.27)を変形する。

$$\frac{A_{ul}}{B_{ul} \bar{J}_s} = \frac{(1 + g_u/g_l) A_{ul}}{\Gamma + (1 + g_u/g_l) \gamma_{ul} n_{\text{tot}}} \quad (1.28)$$

$\Delta\Omega$ は常に小さいことから $\beta \ll 1$ ということがわかる。

この無飽和成長幅 L を用いて飽和領域、不飽和領域におけるレーザー強度の増幅過程について考えていくことができる。

式(1.25)を積分すると強度 $I(s)$ を表すことができる。

$$\frac{I(s)}{I_s} - \frac{I(0)}{I_s} + \ln \left[\frac{I(s)/I_s + \beta}{I(0)/I_s + \beta} \right] = \frac{s}{L} \quad (1.29)$$

$I(0)$ はバックグラウンドのソースインテンシティである。

まず不飽和状態について考える。 $I \ll I_s$ として、式(1.29)の近似解は

$$I(s) = I(0)\exp(s/L) + \beta I_s[\exp(s/L) - 1] \quad \text{unsaturated} \quad (1.30)$$

このとき増幅は指数関数的であることがわかる。 $\ln[I(s)/I(0)]$ の値は一般にレーザーゲインとして適用され、通過する長さに沿って強度は指数関数的に増加する。このような急激な強度増光は上準位による自発放射が終わるタイムスケールまで続くことになり、レーザー強度は変動を示すことになる。次に飽和状態について考える。このとき $I \gg I_s$ であり、式(1.29)の対数項は小さくなる。また二つの準位における遷移では、 $I \approx I_s$ の間で遷移が起きるため以下のように近似できる。

$$I(s) = I_s + I_s \left(\frac{s - s_1}{L} \right) \quad \text{saturated} \quad (1.31)$$

遷移幅 s_1 は式(1.30)の $I(s) = I_s$ から求めることができる。まとめると飽和領域と不飽和領域ではレーザーの増幅率が異なる。そして、その増幅率を支配しているのは上の準位に粒子数を組み上げるpump rateである。本研究においても、この飽和、不飽和領域におけるレーザー増幅の関係を利用した強度変動モデルを採用している。

1.2.2 メタノールレーザー

レーザー放射の中にもいくつかの種類が存在することが明らかになっている。代表的なレーザー分子としてはOH, H₂O, SiO, CH₃OHなどが挙げられ、これらは地上でも観測できること、またコンパクトで輝度が非常に高いことからVLBI観測の対象となり研究が進められている。SiOレーザーの天体例としては星の一生のうち末期に対応するミラ型変光星の χ Cygなどが存在し、43GHzや86GHz帯で観測が進められている。このようにさまざまな分子のレーザー放射が確認されているが、中でもメタノールレーザーは、その生成過程により大きくクラスIとクラスIIに分類されている。

クラスIは、大質量星周りに存在するガス雲と外部からの分子流やジェットとの衝突によって分子が励起されるような衝突励起に起因する。例えば、44GHzなどが該当する。そのため

CHIR(compact HII region)の外側の境界領域でよく観測されている。このクラスIレーザーは、その代表例であるG29.95-0.02やG309.38-0.13, Mon R2などの光度やダストの光学的厚みが大質量星形成領域の典型的なパラメーターと一致することから、大質量星形成領域の早期段階をトレースする手段として考えられている(Minier et al. 2002)。このように衝突励起によるクラスIレーザーにおいては中心星とレーザースポットの位置関係が重要になってくる。

これらに対し、クラスIIとは大質量星形成領域のみに付随する現象である。中心星の赤外線輻射の影響を大きく受ける放射励起に起因するレーザーであることから、大質量星形成の母体天体との相関がよく、大質量星が今まさに生まれている領域の観測対象として研究が進められている。その過程でクラスIIの中には、UCHIR(ultra compact HII region)だけでなく、より若い天体が存在する

ことがわかってきている。代表例である09.62+0.019はUCHIRではなく、むしろHCHIRに付随すると考えられている(Minier et al. 2001)。さらにメーザスポットの空間分布にいくつかのタイプがあり、linear, ring, complex(判別が困難なもの)と呼ばれる。このような空間分布だけでなく、各天体の固有運動についても解析が進められている。本研究の対象となるのは、このクラスIIのメタノールメーザである。

1.3 観測装置

ここからは宇宙から到来する電波を観測する手段として用いられる電波望遠鏡や信号処理について説明する。

1.3.1 単一鏡(Single dish)

単一鏡とはその名のとおり、単一の鏡面を持つ電波望遠鏡のことである。この単一鏡は世界中に存在している。中でも日本に存在する単一鏡は30m以上の直径を持つものが多いことが挙げられる。こういった大口径の望遠鏡の利点としては

- (1) 微弱な放射に対して高い感度をもつ
- (2) 天体の全強度を得ることができる

などが挙げられる。このように電波観測に適した単一鏡だが、建設できる現実的なサイズに限界があり、分解能を高めることができないという弱点もある。このような弱点を埋めるために考え出されたのが次に説明する干渉計という技術であり、単一鏡と干渉計の観測データを組み合わせることで様々な天体情報を得ることができる。

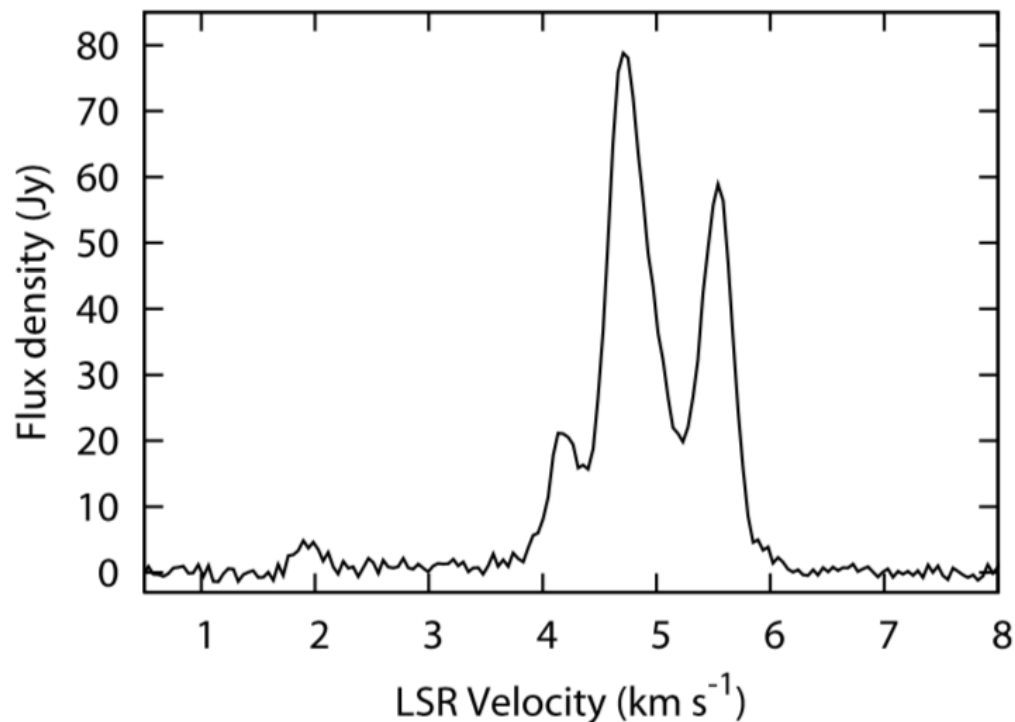


図1.2 単一鏡観測で得られるスペクトルの例 (Sugiyama et al. 2008)

1.3.2 干渉計(Interferometer)

前の章で説明したようにメタノールレーザーのスポットの詳細を見るためには高空間分解能を達成する電波望遠鏡が必要となる。だが、単一鏡の観測では分解能を高めることは難しい。そこで高空間分解能を達成するために考えられたのが、複数の電波望遠鏡を組み合わせることでより大きな一つの望遠鏡として扱う技術である電波干渉計である。

干渉計の分解能は以下のように表せる。

$$\theta_B \sim 1.2 \times \frac{\lambda}{D} \quad (\text{gaussian illumination}) \quad (1.32)$$

$$\theta_B \sim 1.02 \times \frac{\lambda}{D} \quad (\text{uniform illumination}) \quad (1.33)$$

ここで λ は波長、 D はアンテナ間の基線長である。この θ が小さくなるほど高空間分解能ということになる。干渉計においては比較的簡単にアンテナ間距離 D を稼ぐことができるため、空間分解能の向上を狙うことが可能である。また干渉計では単一鏡に比べて感度も向上させることができることが知られている。単一鏡の最低検出電波強度(rms)は以下のように表す。

$$S_\nu(\text{rms}) = \frac{2kT_{\text{sys}}}{\eta A_{\text{phy}} \sqrt{\Delta B \tau}} \quad (1.34)$$

実際の観測ではOn点のほかにOff点も観測するため、雑音が加わり感度は低下する。この低下ファクターを α とすると以下のようにかける。

$$S_\nu(\text{rms}) = \frac{2\alpha kT_{\text{sys}}}{\eta A_{\text{phy}} \sqrt{\Delta B \tau}} \quad (1.35)$$

一方で、 n 素子の干渉計の感度は以下の式で示される。

$$S_\nu(\text{rms}) = \frac{\sqrt{2kT_{\text{sys}}}}{\eta A_{\text{phy}}^* \sqrt{\frac{n(n-1)}{2} \Delta B \tau}} \quad (1.36)$$

A_{phy}^* は素子アンテナの物理開口面積であり、 $A_{\text{phy}}^* = \frac{1}{n} A_{\text{phy}}$ とする。 A_{phy} は単一鏡の開口面積である。これを用いて式(1.36)を書き直すと以下ようになる。

$$S_\nu(\text{rms}) = \frac{\sqrt{2kT_{\text{sys}}}}{\eta A_{\text{phy}} \sqrt{\frac{1-1/n}{2} \Delta B \tau}} \quad (1.37)$$

さらに単一鏡の感度と比較するために、式(1.33)(1.34)の比を取ると以下ようになる。

$$\frac{S_\nu(\text{単一鏡})}{S_\nu(\text{干渉計})} = \alpha \sqrt{1 - \frac{1}{n}} \quad (1.38)$$

式(1.35)は、干渉計に比べて単一鏡の感度が悪いことを表している。

以上のことから干渉計観測におけるメリットをまとめる。

(1) アンテナ同士の距離である基線長の長さが単一鏡の場合のアンテナの口径に相当するので、

高い空間分解能を得ることができる

(2) 局間で大気放射が相関しないので、大気起源の雑音の影響をうけにくい

一方で、絶対強度較正が難しいといったデメリットも存在する。

次に干渉計観測を行う際に必要な幾何学的遅延の補正について説明する。ある二素子干渉計を考える。二つのアンテナにおいてそれぞれの局位置(地球座標系における x, y, z 座標)は異なることから

天体と各アンテナとの間の光路長には差が生じる。これを光路差という。天体から放射された電波がそれぞれのアンテナに到達する時刻の差、すなわち遅延時間のことを幾何学的遅延(τ_g)といい、相関処理の際にはこの値を補正しなければ天体の放射を検出することができない。

幾何学的遅延量は基線ベクトル $\mathbf{D}$ と天体方向の視線ベクトル $\mathbf{s}$ を用いて

$$\tau_g = \frac{1}{c} \mathbf{D} \cdot \mathbf{s} \quad (1.39)$$

と表される。^{*2} この幾何学的遅延量の補正は一般的には相関器の中であらかじめ予測した遅延量を挿入することによって行われることが多い。本研究では相関処理の際にキャリブレーションのデータから求めた予測遅延量をメーザー天体にも適用することで遅延補正を行っている(4章で記載)。ただし、幾何学的遅延量は地球回転に伴って時々刻々変化するために、それに応じて予測遅延量も変化させる必要がある。それでもなお局位置の誤差、天体座標の誤差などにより完全に補正することは難しい。

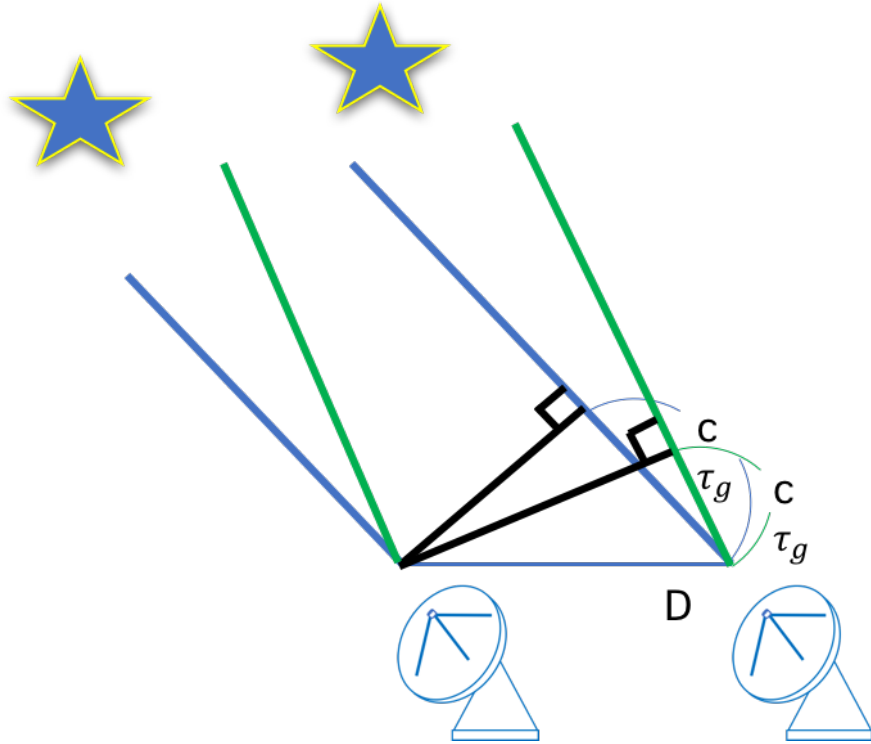


図1.3 干渉計観測のモデル図

次に干渉計の種類について説明する。干渉計には大きくわけて二つのタイプが存在する。

(1)結合素子型干渉計

(2)VLBI(Very Long Baseline Interferometer : 超長基線干渉計)

同一の時刻基準装置を用いているかないかでこれらを区別する。また、解析時における相関処理の仕方も異なる。結合素子型の場合、各アンテナからのデータ間の相関をリアルタイムでとる。このような処理が可能、つまり基線長が比較的短いことも、特徴としてあげられる。一方、VLBIでは基線長が長距離になるため観測終了後にデータを持ち寄って相関処理を行う。本研究で行う観測はVLBI観測によるものであり、日本VLBI観測網(JVN)のうちの数局を用いた観測となる。実際の観測についての詳細は4章に記載するが、ここでは代表的なVLBI観測網を紹介しておく。

^{*2} 光速 $c = 2.99 \times 10^8 \text{m/s}$

(1)VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry)

・・・入来局 (鹿児島県), 石垣局 (沖縄県), 小笠原局 (東京都), 水沢局 (岩手県)からなる最長約2300kmに及ぶVLBI観測網

(2)JVN (Japanese VLBI Network)

・・・日本に存在する観測局を用いたVLBI観測網の名称

(3)EVN (European VLBI Network)

・・・ヨーロッパだけでなくアフリカなども参加する巨大なVLBI観測網の名称

(4) VLBA (Very Large Baseline Array)

・・・アメリカ国土全体に配置された観測アレイ

(5)EAVN (East Asian VLBI Network)

・・・東アジアの観測局が参加する巨大なVLBI観測網の名称

これらのネットワークを使用することで高空間分解能を達成できるだけでなく、近年はALMAやSKAといった先端の観測装置もVLBI観測に使用されている(SKAは予定)ため、より高度な観測を行うことが可能になっている。本研究ではJVNに含まれるアンテナのうち4台を用いたVLBI観測を行った。

第2章

研究背景,目的

2.1 研究背景

2.1.1 メタノールメーザーの強度変動

茨城大学の電波天文観測研究室では2012年から自ら運用する日立・高萩32m望遠鏡を使ってメーザー天体のモニター観測を実施してきた。その対象天体は周期的もしくは突発的な強度変化を起こす天体である(Goedhart et al. 2003)。これらを受けてモニター観測を行なった結果、新たに周期性を持つ天体も同定されている(安井靖堯 修士論文, 2015)。以下に周期的な強度変動と突発的な天体の強度変動の例を示す。

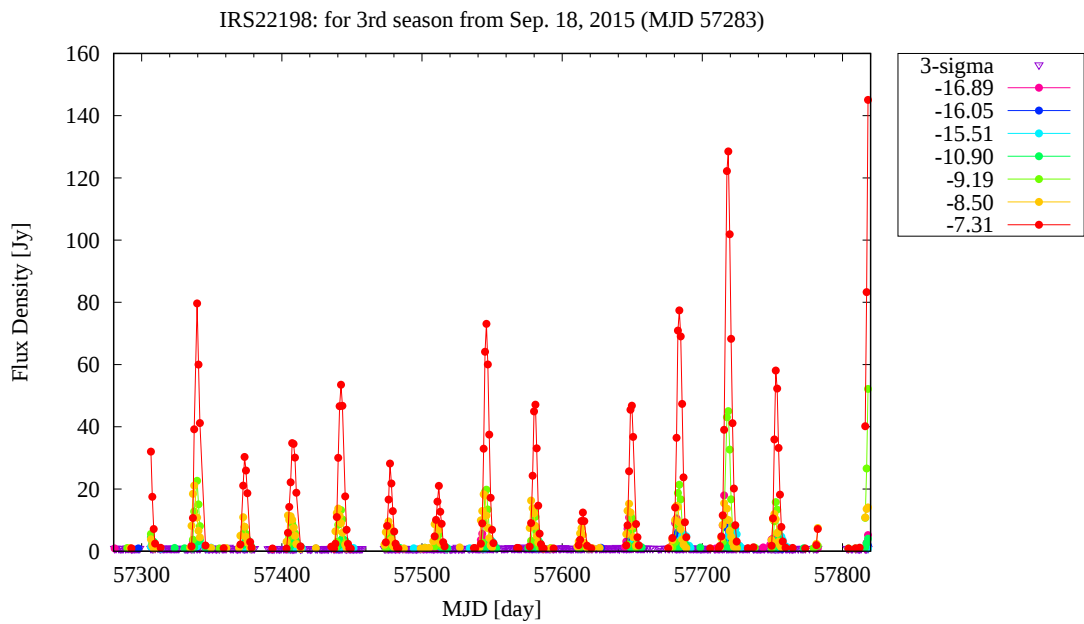


図2.1 IRS22198のモニター観測による周期変動プロット(山口貴大 修士論文, 2017)

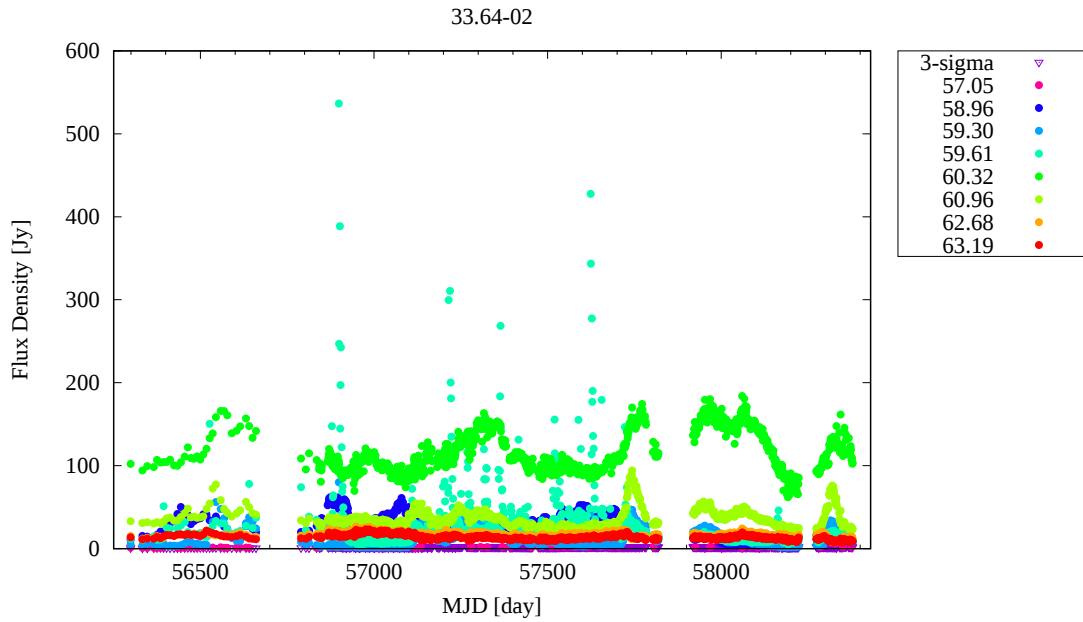


図2.2 G33.64-00.21のモニター観測による突発変動プロット(山口貴大 修士論文, 2017)

ここで述べている周期的な変動とは、ある決まった周期で天体の強度が増大と減少を繰り返す現象のことであり、G9.62+0.20EやG174.19-0.09, IRS22198といった天体が挙げられる。特にG9.62+0.20Eは約246日の周期性を持ち、成分Cでは12.2GHzのメーザー(1.21km/s)と6.7GHzのメーザー(1.24km/s)が同時にバーストすることが確認されている(Goedhart et al. 2003)。一方、突発的な変動というのは決まった周期を持たず瞬間的に強度が増大しその後すぐに減少するという現象であり、G014.33-00.63やG075.76+00.34, G33.64-00.21などがあげられる。このような周期的もしくは突発的な強度変動を起こすメカニズムとして、これまでさまざまなモデルが考案されている。以下に強度変動モデルをまとめる。

●脈動変光モデル(Inayoshi et al. 2013)

原始星回りの物質が質量降着を起こすことによって原始星が進化し、最大半径になると原始星が脈動を始める。これにより周囲のダストの温度が変動することによってメーザーの放射に適した領域が増減し、放射励起に起因するメーザーの強度も変動するというモデルである。このモデルでは数十〜数百日程度の周期変動を説明することができる一方で、連続的でない変動、つまり突発的に上昇するバーストを説明することはできない。

●磁気リコネクションモデル(Vlemmings et al. 2009, Fujisawa et al. 2012)

磁気リコネクションとは磁場中のトポロジーが再配置され、磁場のエネルギーが運動エネルギーなど他のエネルギーに変換される現象である。宇宙空間では大質量星の周辺で磁気リコネクションが起きることでエネルギーが周囲のガスやダストを加熱するエネルギーに変換される。この加熱されたダストが赤外線を放射することによってメタノールメーザーが励起され、突発的にメーザーの強度変動が起きる。このモデルでは磁場の再配置の特性上、二週間以上の周期性を持つ変動を説明することができない。

●Colliding Wind Binaryモデル(van der Walt 2011)

ターゲットとなる天体が連星系を成している場合に適用できる。主星と伴星の恒星風が衝突することで生じる衝撃波によってHII領域との境界にある中性ガスが電離され、メーザーの種光子となるHII領域からの自由-自由放射が増大しメーザー放射も増大するというモデルである。強度変動を説

明することはできるが、HIIや連星の存在が必須など条件が厳しいことから適用できる天体が少ないことが難点である。

しかし、我々の研究室によるモニター観測しているG33.64-00.21などの天体ではあるメーザー成分のみが数日間に強度が数十倍もしくは数百倍になるバーストと呼ばれる現象も確認されている。このようなバーストを上記の輝度変化モデルを用いて完全に説明することはできない。以下がG33.64-00.21のバーストである。

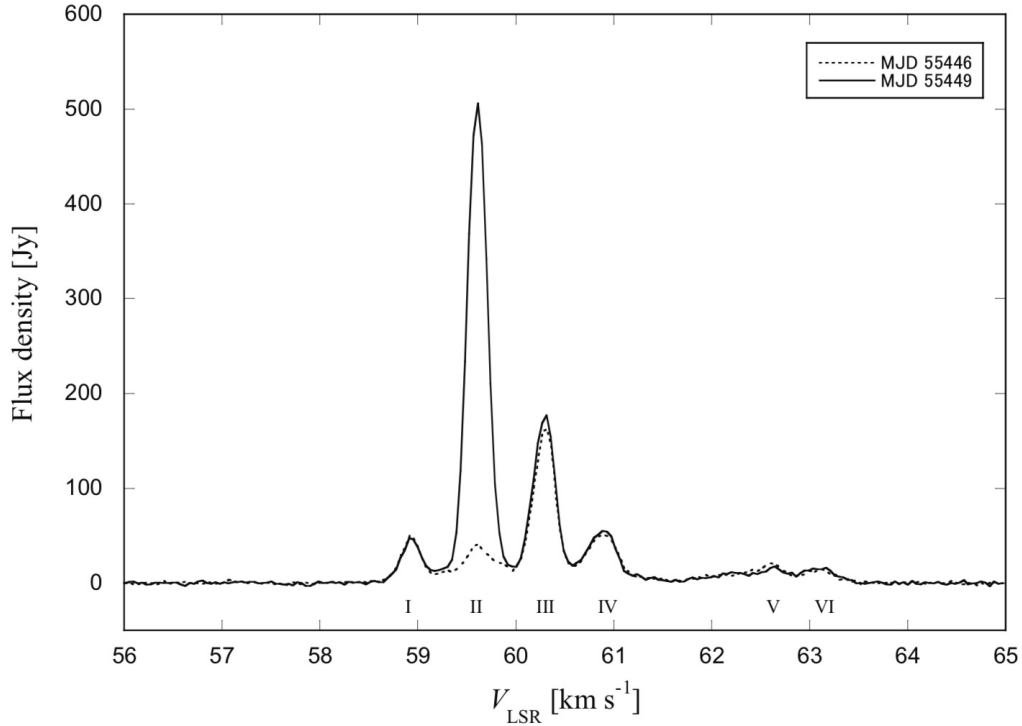


図2.3 G33.64-00.21の短日における強度変動プロット(Fujisawa et al. 2014)。三日でフラックス密度が約10倍に達した。

このようなバーストは若い大質量星の周りにあるガス円盤内に蓄積した磁場エネルギーの開放によって起こると考えられているが、その具体的なメカニズムの説明やどの天体がバーストを起こすかといったことは未解明である(Fujisawa et al. 2014)。そしてこのような強度変動をこれまで記述したモデルだけで完全に説明することは難しいということも明らかになってきている。そこで本研究では「メタノールメーザー源の放射領域サイズの変化」モデルを考案した。

2.1.2 メタノールメーザー源の放射領域サイズ

これまでメタノールメーザー源の放射領域に関連した先行研究は数えるほどでしかない。その中でも本研究の導入ともいえる先行論文としてMinier et al. (2002)が挙げられる。この論文ではメーザー放射を行うメーザースポットの構造について、コンパクトなCoreと広がった構造のHaloという二つの領域に切り分けている。Coreというのはメーザーの励起機構における不飽和領域(unsaturated region)のことであり、強度が指数関数的に増加することから強いメーザー放射(Strong maser)をすることが可能であると考えられている。一方でHaloとは、中心に存在するCoreを包む飽和領域(Saturated region)のことであり、弱いメーザー放射(weak maser)を行う。

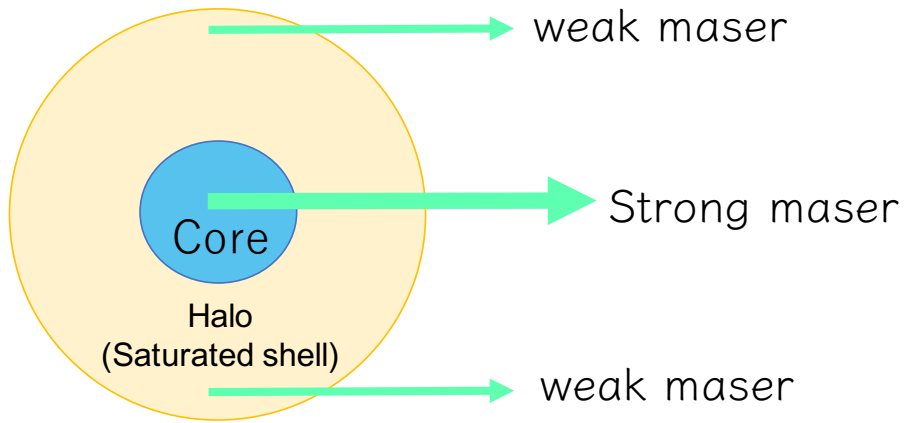


図2.4 メーザースポットのcore,haloの構造とメーザー放射の関係

さらにMinier et al. (2002)では、VLBI観測を用いて得られたビジビリティと観測基線に対応するuv-distanceを用いて作成したvisivility-plotからcoreとhaloのサイズを推定している。

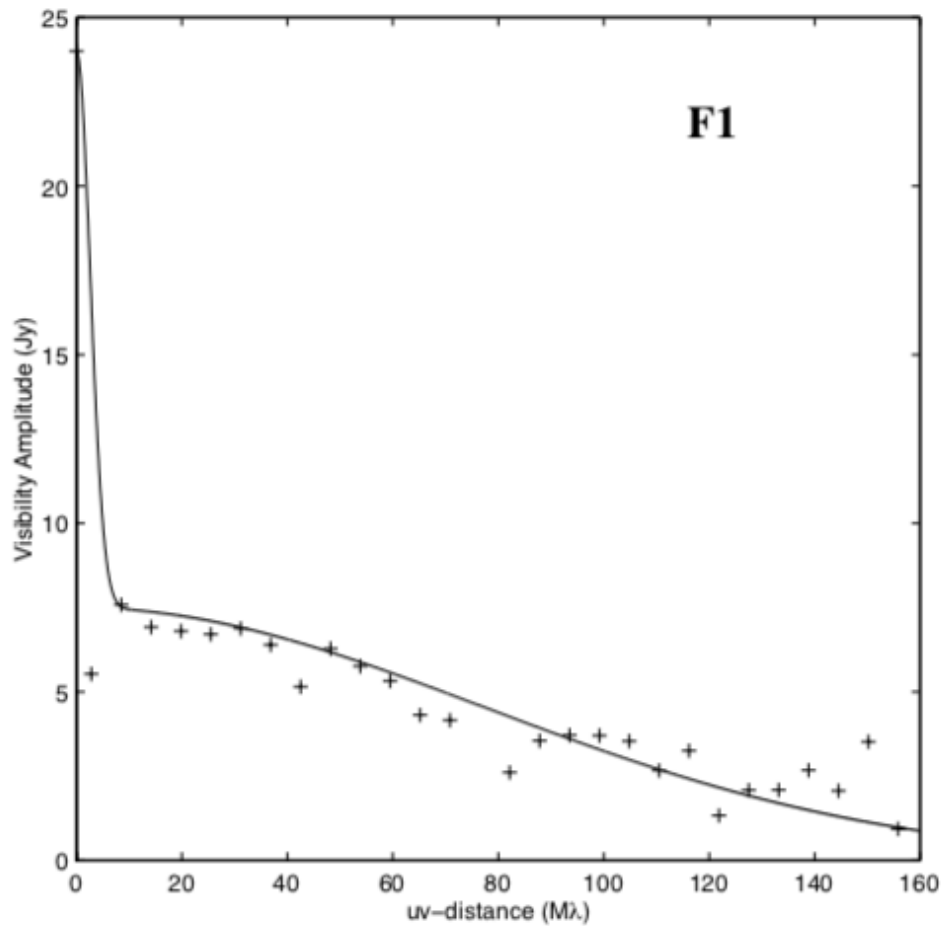


図2.5 NGC7538のvisivility-plot(Minier et al. 2002)

本研究で新しく考案したモデルである「放射領域サイズの変化」とはこのCoreとHaloの領域サイズが時間変化するというものである。強いメーザー放射を行うことができるcore領域がhaloにまで拡大する、つまり天体の立体角が変化することによって我々が地球上で観測するフラックス量も変化すると思われる。これを数式で表すと $F_{\text{obs}} = I_{\text{core}} \times \Omega_{\text{core}} + I_{\text{halo}} \times \Omega_{\text{halo}}$ となる。 $I_{\text{core}}, I_{\text{halo}}$

はそれぞれcore, haloにおける強度、 $\Omega_{\text{core}}, \Omega_{\text{halo}}$ はそれぞれcore, haloの立体角である。ここで注意しなければならないのが、 $I_{\text{core}}, I_{\text{halo}}$ は各領域で一様であると仮定するということである。なお $I_{\text{core}} > I_{\text{halo}}$ である。増光時には Ω_{core} が大きくなるため、 F_{obs} が大きくなる。

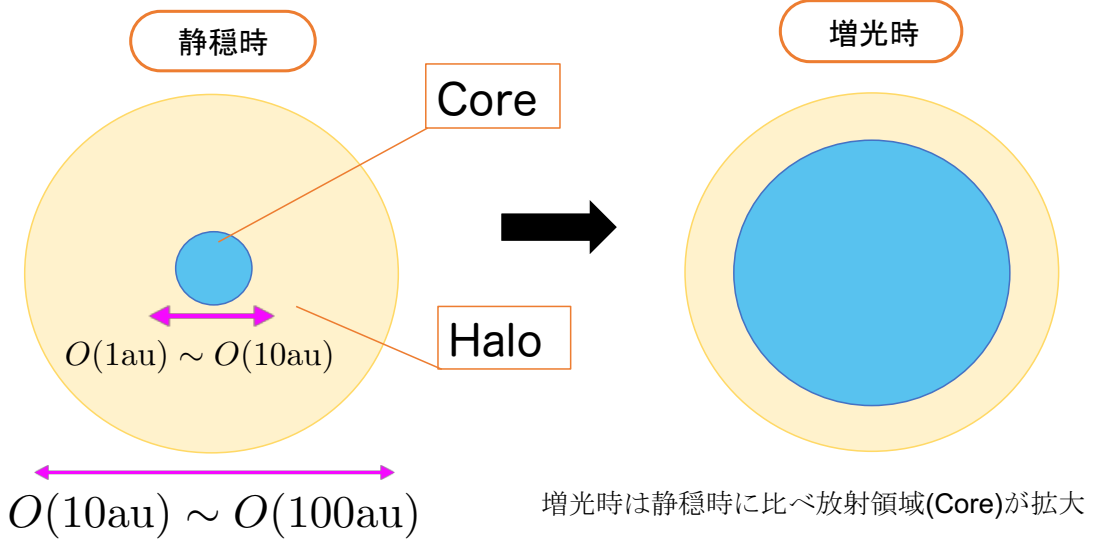


図2.6 メーザー放射領域のサイズ変化イメージ

coreとhaloのサイズはそれぞれ数au~数十auと数十au~数百auと考えられており、二桁以上の強度上昇を説明することが可能であると考えられる。

2.2 研究目的

本研究の目的はメタノールメーザーの強度変動を放射領域サイズの変化という観点から解明することである。上述したように、メタノールメーザーの強度変動について既存の輝度変化モデルに加えて領域サイズ変化モデルを追加することによって、二桁以上にも及ぶ強度の増光が説明されることを検証することである。実際にメーザーの放射領域サイズをこのような方法で推定することができれば強度変動を説明するだけでなく、今後のメタノールメーザーにおけるVLBI観測の際に、あらかじめ観測天体のサイズに応じて必要な観測方法の予測をすることが可能になると考えられている。

本論文ではメタノールメーザーの放射領域サイズの推定方法の確立と、実際に算出したcore, haloのサイズまでを示す。次の章では天体の放射領域サイズの推定方法とサイズ変化の捉え方について説明する。

第3章

研究手法

3.1 放射領域サイズの推定

天体の放射領域サイズを推定するには、天体からのフラックス、つまり放射輝度に対応するビジビリティが基線長を天体からみたときの長さであるuv-distanceに対してどのように変化するかという情報が必要である。この章ではビジビリティやuv-distanceについて説明した後、実際のサイズ推定の方法を記す。

3.1.1 空間周波数とuv-distance

まず空間周波数について説明する。空間周波数は基線ベクトルの長さを波長単位で表したものである。成分ごとに分けて書くと以下ようになる。

$$(u, v, w) = \left(\frac{D_x}{\lambda}, \frac{D_y}{\lambda}, \frac{D_z}{\lambda} \right)$$

D は基線長の各成分。一般的に周波数は波の振動回数のことである一方、空間周波数は $u = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial l}$ と書かれ方向余弦あたりのフリンジ振動回数を表す。ここで ϕ はフリンジの位相である。この空間周波数が大きいとわずかな天体位置の違いが、大きなフリンジの位相差として観測される。

干渉計観測によって得られたビジビリティの台(u,v)をuv-coverageといい、このuv-coverageを埋めるためには複数・多数の基線による観測が必要となる。だが本研究ではこのuv-coverageを埋める必要がないのである時間における長さであるuv-distanceをグラフに用いる。次にuv平面における基線長であるuv-distanceについて説明する。

uv-distanceとは地球上に配置されているアンテナ間の距離である基線長を天体方向に垂直な平面に射影した長さのことである。本研究では方向余弦と二回の座標変換を用いたuv-distanceの導出方法を使用する。まずある時刻における天体の方位角 Az 、仰角 El とから、地平座標における天体方向の視線方向単位ベクトルの方向余弦を以下のようにして求める。

$$\begin{aligned} s &= \cos(El) \\ \phi &= 180 - Az \\ l &= s \cos(\phi) \\ m &= s \sin(\phi) \\ n &= \sin(El) \end{aligned}$$

ここで方向余弦はそれぞれ x が南方向、 y は東方向、 z は鉛直方向とし、 Az は北側から東周りに測るものとする。この地平座標系における視線方向ベクトルの方向余弦と回転行列の積をとることで地球座標系における視線方向ベクトルの方向余弦を求める。回転行列は方向余弦ベクトルを観測局の緯

度・経度分だけ逆回転させる。回転前の地平座標系に置ける方向余弦ベクトルを x, y, z として、回転後の地球座標系における方向余弦ベクトルを X, Y, Z と表記すると以下のように書くことができる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\psi) & \sin(-\psi) & 0 \\ -\sin(-\psi) & \cos(-\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

ここで ψ と θ はそれぞれ経度,緯度の角度に対応する。

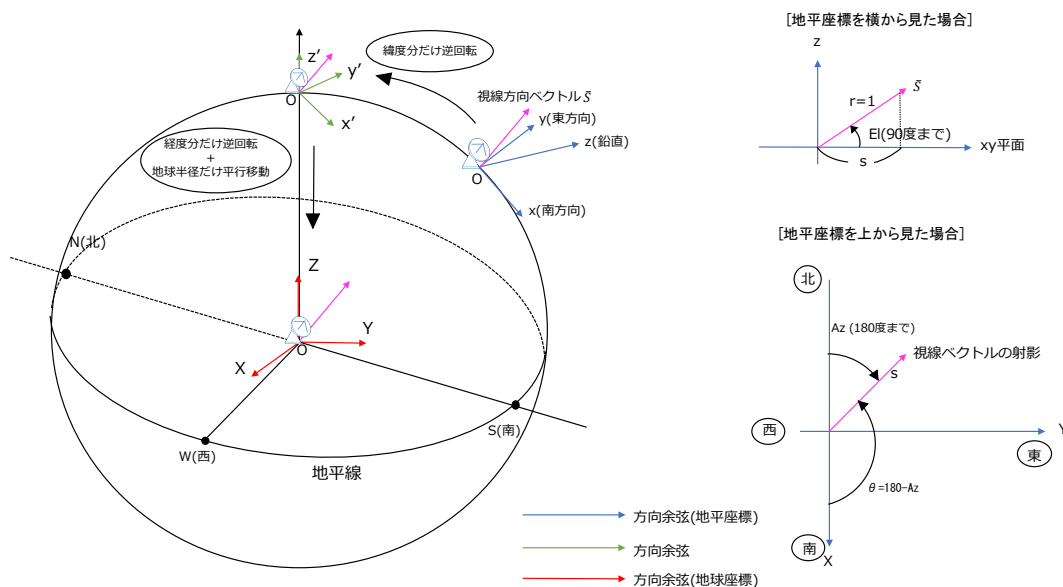


図3.1 地平座標における方向余弦から地球座標系における方向余弦への変換

この回転によって導出した地球座標系における方向余弦ベクトルと基線長の内積を取ることで射影成分を求めることができる。実際に求めたい長さは視線方向に垂直な平面に射影した長さであるので以下の関係式を用いてuv-distanceを求める。^{*1}

基線長とuv-distanceの関係

$$(\text{基線長})^2 = (\mathbf{D} \cdot \mathbf{s})^2 + (\text{uv-distance})^2$$

つまり、uv-distanceとは $\mathbf{D} \cdot \mathbf{s} \cdot \sin \theta$ ということである。本研究において1天体あたりの観測時間は5分であり、uv-distanceの導出に使用する Az, El は観測時間の中間値とする。

それぞれの観測局の緯度・経度を一覧としてまとめる。

表3.1 観測局の緯度・経度

観測局	緯度	経度
日立局	東経140度41分32秒	北緯36度41分51秒
高萩局	東経140度41分41秒	北緯36度41分55秒
鹿島局	東経140度39分36.32秒	北緯35度57分21.78秒
山口局	東経131度33分26秒	北緯34度12分58秒

^{*1} θ は基線ベクトル $\mathbf{D}$ と視線方向ベクトル $\mathbf{s}$ のなす角とする

3.1.2 ビジビリティと輝度分布

干渉計観測で得られるビジビリティと天体の輝度分布の関係について説明する。干渉計で観測を行うと、二つのアンテナで得られた電氣的信号（電圧）に幾何学的遅延の補正を加えて積をとった相互相関関数（電力）が得られる。入力電圧信号をそれぞれ以下とする。

$$V_1(t) = \mathbf{a}_1 E_0 \cos(2\pi\nu_0 t) \quad (3.1)$$

$$V_2(t) = \mathbf{a}_2 E_0 \cos[2\pi\nu_0(t + \tau_g)] \quad (3.2)$$

この二つの信号の相互相関関数は以下で定義される。

$$C_{1,2}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} V_1(t - \tau_1) V_2^*(t - \tau) dt \quad (3.3)$$

$$= \frac{1}{2} \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* |E_0|^2 \cos(2\pi\nu_0(\tau - \tau_1 + \tau_g)) \quad (3.4)$$

ここで τ_g は幾何学的遅延、 τ_1 は遅延補正である。この相互相関関数を時間(τ)と周波数(ν)でフーリエ変換したものがクロスパワースペクトルである。クロスパワースペクトルは以下のように書くことができる、

$$\hat{C}_{1,2}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{1,2}(\tau) \exp(-2\pi i \nu \tau) d\tau \quad (3.5)$$

$$= \frac{1}{4} \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* |E_0|^2 \delta(\nu - \nu_0) \exp(-2\pi i \nu_0(\tau_1 - \tau_g)) \quad (3.6)$$

さらにこれを空間周波数で書き直したものがビジビリティである。干渉計観測においてはビジビリティが観測量ということである。さらにビジビリティと輝度分布の間の関係はVan Cittert-Zernikeの定理から一次元では以下の式で表すことができる。

$$\mathcal{V}(\nu, u) = \mathbf{a}_1 \mathbf{a}_2^* \int_{\text{source}} I(\nu, l) \exp(2\pi i u l) dl \quad (3.7)$$

二次元では以下のようにかける。

$$\mathcal{V}_\nu(u, v) = \mathbf{a}_1(l, m) \mathbf{a}_2^*(l, m) \int_{u=-\infty}^{\infty} \int_{v=-\infty}^{\infty} I_\nu(l, m) e^{2\pi i (ul + vm)} dl dm \quad (3.8)$$

式(3.7)から様々な空間周波数(u)でビジビリティを取得し、それを $l \longleftrightarrow u$ で逆フーリエ変換することによって天体の輝度分布 $I(l)$ を得ることができる。本研究では天体の輝度分布の変化を捉えることができればよいので、多くの空間周波数におけるビジビリティは必要としない。そのかわり、ある基線長とそれに対応する空間周波数におけるビジビリティから天体の輝度分布の見積もりを行うことで、天体の放射領域サイズを推定することが可能となる。

3.1.3 visibility-plotを用いた放射領域サイズの推定

これまで天体信号であるビジビリティと基線長の投影成分であるuv-distanceについて説明してきた。ここではそれらを用いて作成するvisibility-plotとサイズ推定の方法を説明する。visibility-plotとは横軸にuv-distance、縦軸にvisibilityをとった図である。この図を作る意味について説明する。まず非常にコンパクトな点源天体を干渉計観測した場合、得られる強度は基線長に対してどのように変化するだろうか。基線長を長くすれば分解能の値は上がりより詳細な構造を見ることが可能に

なるが、点源天体の場合は分解することができないため観測される強度は一定になると予測できる。その模式図を以下に示す。

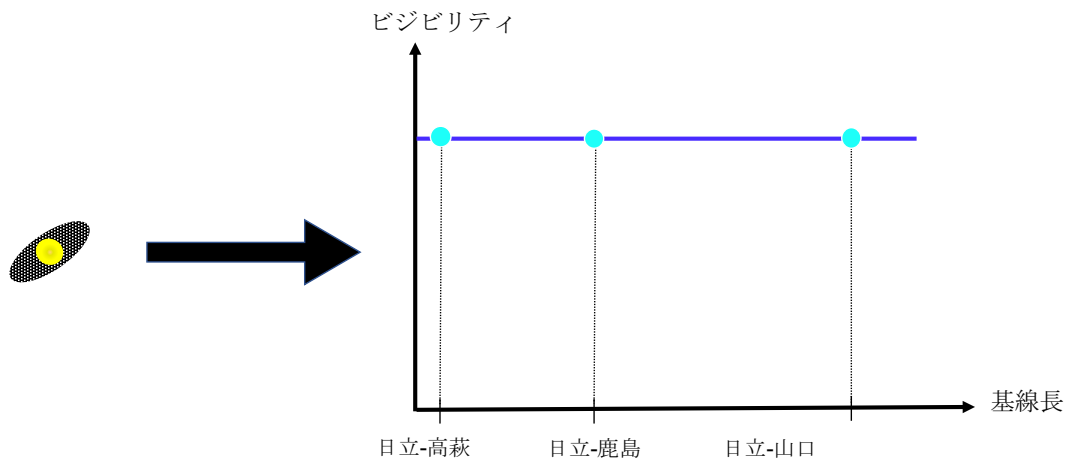


図3.2 点源天体を干渉計観測した場合のビジビリティ変化

一方、天体が広がった構造などを持っている場合には基線長が長くなると、より構造が分解されていくと予想できる。

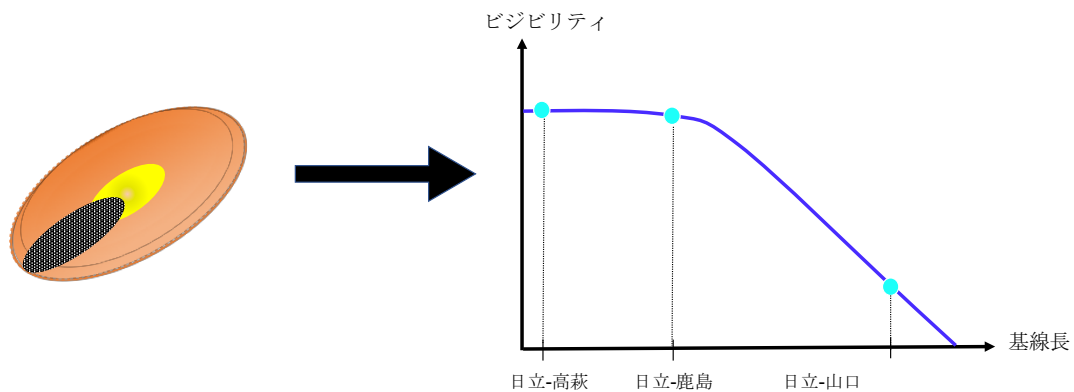


図3.3 構造天体を干渉計観測した場合のビジビリティ変化

この図を観測されたビジビリティと uv-distance で書き換えたものが visibility-plot であり、これを用いてサイズ推定を行う。

ビジビリティが天体の輝度分布とフーリエ変換の関係にあることは式(3.7)からわかる。つまりこの visibility-plot の減衰の始まったときの uv-distance が天体構造を分解するかどうかの閾値ということになる。減衰の傾向からグラフの形状を読むことによって、天体構造がガウシアンであったり他の関数形に近似することができればそれをフーリエ変換したグラフの形状を考えることによって天体の構造を推定することができる。サイズとしてはビジビリティ値が半分に減少したときの uv-distance を読み取ることによって推定することが可能である。

3.2 放射領域サイズ変化の推定

天体の強度変動については強度安定している期間を静穏期、強度が静穏期に比べ増大している期間を増光期と呼ぶ。それを踏まえた上で放射領域サイズの変化を捉えるための方法としては、複数の時期に同じ天体を観測する必要がある。天体の強度が周期変動をする場合、その周期は Szymczak

et al. (2011), Szymczak et al. (2014), Szymczak et al. (2015)やGoedhart et al. (2003)などによって同定されており、本研究の対象となっているメーザー源の周期も含まれている。また電波天文観測研究室ではメーザー源に対して、高頻度のモニター観測を実施していることから、それらの天体の静穏期、増光期に合わせて観測を実施することができる。このような観測をすることで天体の強度を取得することができ、それらを使ってvisibility-plotを作成し、その形状を比較することによって異なる時期で天体のサイズが変化しているかどうかを確認することができる。

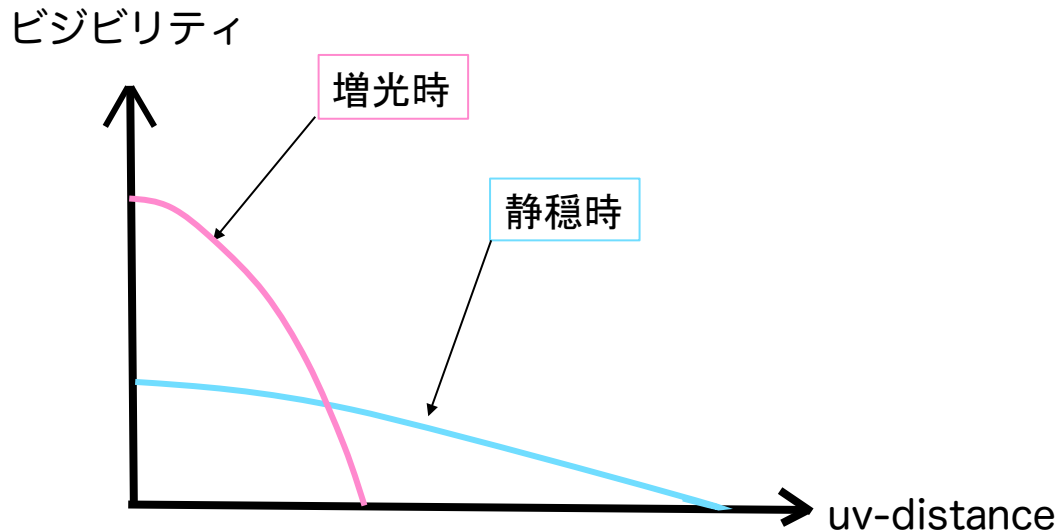


図3.4 静穏期と増光期におけるフラックス変化のイメージ

静穏期は放射領域サイズがコンパクトであることから長基線においても構造が分解されない。このことから上図のように青ラインが静穏期となる。この図はcore, haloのサイズ推定のグラフと混同しやすいので注意が必要である。

第4章

観測と解析

この章では少数基線VLBIを用いたメタノールメーザー天体の観測の内容とデータの相関処理方法について紹介する。

4.1 観測諸元

4.1.1 アンテナ

茨城局(高萩アンテナ32m望遠鏡 [以下高萩局と呼ぶ]、日立アンテナ32m望遠鏡 [以下日立局]), 鹿島局(NICT34m望遠鏡), 山口局(山口第一アンテナ32m望遠鏡)の4局のアンテナを用いた合同VLBI観測を実施した。

観測日は2016年10月26日、観測周波数は6664-6672 [MHz]、システム雑音温度はそれぞれ30[K], 30[K], 150[K], 110[K]であり、検出偏波は日立, 高萩, 山口は左円偏波, 鹿島は垂直偏波である。各局の運用は、茨城局 - 杉山孝一郎, 鹿島局 - 岳藤一宏, 山口局 - 藤沢健太(敬称略)に行っていた。



図4.1 VLBI観測網

各観測局の緯度、経度を以下に示す。^{*1}

station name	latitude (緯度)	longitude (経度)
Hitachi (H)	36°41′51″	140°41′32″
Takahagi (T)	36°41′55″	140°41′41″
Kashima (O)	35°57′21.78″	140°39′36.32″
Yamaguchi (K)	34°12′58″	131°33′26″

本研究では、各局で受信された電波の周波数6664 - 6672MHzを0 - 8MHzに変換した後にK5/VSSP32に入力した。サンプリング周波数およびAD分解能(bit)はそれぞれ16GHz, 4bitである。

4.1.2 サンプラー

本研究で使用したサンプラーは情報通信研究機構(NICT)の鹿島VLBIグループが開発したVLBI用高機能サンプラーK5/VSSP32である。サンプラーの詳細を以下の表に記載する。

サンプリング周波数 [MHz]	0.04, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64
内蔵デジタルLPF(ローパスフィルター) [MHz]	2, 4, 8, 16, through
入力電圧範囲	-1 [V] ~ +1 [V]
AD変換器アナログ帯域幅 [Hz]	300 [MHz]
AD分解能 [bit]	1,2,4,8
ボードあたりのチャンネル数 [ch]	1,4
ボードあたりの最大データレート [bps]	256 [Mbps]
DCオフセット調節機能	ホストPCからリモートで可能
標準信号入力	1 [PPS], 10 [MHz] または 5 [MHz]
データフォーマット	VSSP32 フォーマット
インターフェース	USB 2.0

表4.1 K5/VSSP32サンプラー性能

4.1.3 観測対象天体(メタノールメーザー源)

茨城大学では大質量星の形成過程の解明を目指して6.7GHzメタノールメーザーの強度変動のモニター観測を行なっている。茨城局から観測可能な6.7GHzメタノールメーザー約450天体の中から、茨城大学が2012- 2015年に行なった観測で比較的大きな強度変動を示した約150天体が選定された。2015-2017年の期間は、これら約150天体を4つのグループに分け、約4日に一度の頻度でモニター観測を実施していた。本研究はこのモニター観測と同時に実施したため、観測日当日の2016年10月26日に観測が予定されていた56天体を、研究対象天体として選定した。

^{*1} <http://www.miz.nao.ac.jp/content/facility/ibaraki-station>
<http://www2.nict.go.jp/sts/stmg/34m/antenna-34m/index-J.html>
<http://www.miz.nao.ac.jp/content/facility/yamaguchi-station>

object name	RA	Dec	強度変動周期(day)
0.167−0.446	17h47m45.46s	29°01′29.3″	47.6
10.205−0.345	18h9m28.43s	20°16′42.5″	—
10.287−0.125	18h8m49.36s	20°05′59″	—
10.323−0.160	18h9m1.46s	20°08′06.9″	—
10.320−0.259	18h9m23.3s	20°05′07.8″	—
11.109−0.114	18h10m28.25s	19°22′29.1″	—
111.24−0.76	23h16m5.4s	59°55′22″	—
111.53+0.76	23h13m45.36s	61°28′10.55″	—
12.025−0.031	18h12m1.86s	18°31′55.7″	213
12.625−0.017	18h13m11.3s	17°59′57.6″	—
121.28+0.65	00h36m47.35s	63°29′02.18″	—
123.05−6.31	00h52m24.19s	56°33′43.17″	163.9
13.657−0.599	18h17m24.26s	17°22′12.5″	—
14.230−0.509	18h18m12.59s	16°04′22.8″	23.9
14.33−0.63	18h18m53.37s	16°47′39.5″	71.1
14.631−0.577	18h19m15.21s	16°30′04.5″	—
174.19−0.09	05h30m42s	33°47′14″	46.9,47.5,112.5,125.8,46.5
18.341+1.768	18h17m58.13s	12°07′24.8″	—
19.755−0.128	18h27m31.66s	11°45′55″	21.9
192.60−0.05	06h12m54.00s	17°59′23.21″	152.4,142.3,66.7
213.70−12.6	06h7m47.862s	06°22′56.52″	—
23.19−0.38	18h34m55.2s	08°49′14.2″	—
24.93+0.08	18h36m31.55s	07°04′16.8″	133.9
25.38−0.18	18h38m14.3s	06°47′47″	—
25.41+0.10	18h37m16.92s	06°38′28″	245
25.65+1.04	18h34m20.91s	05°59′40.5″	165
25.82−0.17	18h39m3.63s	06°24′9.5″	71.0
26.52−0.26	18h40m40.23s	05°49′07.5″	172
27.22+0.13	18h40m30.43s	05°00′59″	—
32.03+0.06	18h49m37.3s	00°45′47″	57.0
33.64−0.21	18h53m28.7s	00°31′58″	119,201
35.02+0.35	18h54m0.65s	02°01′19.23″	252
35.20−0.74	18h58m13.05s	01°40′35.67″	—
35.20−1.74	19h01m45.53s	01°13′32.55″	—
35.79−0.17	18h57m16.89s	02°27′58.05″	33.4
351.775−0.536	17h26m42.57s	36°9′17.6″	292
36.10+0.56	18h55m15.6s	02°27′58.05″	—
37.40+1.52	18h54m10.5s	04°40′49″	—
38.26−0.08	19h1m26.23s	04°42′17.26″	—

4.434+0.129	17h55m19.74s	25°03′44.8″	365.05
43.87−0.77	19h14m26.39s	09°22′36.53″	—
45.44+0.07	19h14m18.29s	11°08′58.97″	—
52.20+07	19h24m59.84	17°25′18.10″	—
52.66−1.09	19h32m36.07s	16°57′38.46″	14.8,14.9
53.62+0.04	19h30m23.01s	18°20′26.68″	—
06.539−0.108	18h0m50.86s	23°21′29.8″	—
06.610−0.082	18h0m54.03s	23°17′03.1″	—
06.795−0.257	18h1m57.75s	23°12′34.9″	—
69.52−0.97	19h30m23.01s	31°31′35.06″	—
07.632−0.109	18h3m11.63s	22°24′32.4″	—
08.139+0.226	18h3m00.75s	21°48′09.9″	—
09.621+0.196	18h6m14.67s	20°31′32.4″	243.3
94.58−1.79	21h39m58.26s	50°14′20.96″	—
G351.2+0	17h20m17.76s	−35°54′42.8″	—
G353.2+0	17h26m01.59s	−34°15′14.90″	—
IRS22198	22h21m22.50s	63°51′13.00″	34.5

表4.2 観測天体のRA, DEC, 変動周期

4.1.4 キャリブレーター

干渉計観測で生じる幾何学的遅延の補正や装置に起因するノイズやバックグラウンドからの信号を取り除くためにはキャリブレーター天体を観測する必要がある。キャリブレターの選出には NRAOのキャリブレーターリストを活用した。キャリブレターの選出方法は、観測基線長において、全フラックスを取得することができるようなコンパクトであること、強度が既知であること、強度が高いことなどが挙げられる。つまり、非常にコンパクトかつ強度が高い点源天体である必要がある。そこで過去のVLBI観測で使用したことのあるキャリブレーター8天体の中から本研究の観測基線長でも分解されないと期待されたコンパクトな天体を選出した。以下に8天体を記す。()内は観測スケジュールにおける天体名である。^{*2}

source name	RA	DEC	RA error	DEC error
J0927+3902 (4C39.25)	09h27m03.31s	39°02′20.85″	0.130	0.100
J1733−1304 (NRAO530)	17h33m02.70s	−13°04′49.54″	0.100	0.100
J0555+3948 (DA193)	05h55m30.80s	39°48′49.16″	0.130	0.100
J2253+1608 (3C454.3)	22h53m57.74s	16°08′53.56″	0.676	0.718
J1640+3946 (NRAO512C)	16h40m29.63s	39°46′46.02″	0.130	0.100
J0137+3309 (3C48)	01h37m41.29s	33°09′35.13″	0.520	0.500
J0433+0521 (3C120)	04h33m11.09s	05°21′15.61″	0.475	0.352
J0854+2006 (OJ287)	08h54m48.87s	20°06′30.64″	0.110	0.100
J1649+0412	16h49m27.67s	04°12′03.98″	0.468	0.883

表4.3 観測天体のRA, DEC, RAerror, DECerror

^{*2} <http://www.aoc.nrao.edu/~cwalker/sched/catalogs/sources.vlba>

これらの天体の中から観測スケジュールに組み込むことが可能かつ上記に示した条件を満たす天体を選別した。各天体のvisibility-mapおよびclean-mapにおけるビームサイズを比較することによって、VLBI観測波長で点源であるかを判断した。各天体のvisibility-mapおよびclean-mapはappendix Bに記載する。その結果、4C39.25, DA193, NRAO512Cの3天体をキャリブレーターとして選択した。

4.1.5 観測諸元のまとめ

次にアンテナの各パラメータ,観測条件の詳細を以下の表にまとめて記載する。

観測局	日立局32m(H) - 高萩局32m(T) - 鹿島局34m(O) - 山口局32m(K)
観測日	2016年10月26日 02:30:00 - 17:23:30 (UT)
観測天体	6.7GHzメタノールメーザー源56天体
キャリブレーター	NRAO512 (Quasar), DA193(Quasar), 4C39.25(Quasar)
観測周波数	6664 - 6672 [MHz]
帯域幅	8MHz
積分時間	300秒
システム雑音温度	30 [K] (日立、高萩), 150 [K] (鹿島), 110 [K] (山口)
偏波	LHCP(日立,高萩,山口),VP(鹿島)
サンプリング	16 MHz $\times$ 4 bit

表4.4 観測概要

4.2 相関処理

VLBI観測に参加したアンテナで得られたデータを茨城大学のPCに集約し、各局、各基線ごとに相関処理を行った。まず各局で自己相関処理を行なった。次にアンテナ四局に対して二局を選び処理を行うことで、計6基線の相互相関処理データを得た。それぞれの基線と相関処理の際に使用した略称,それぞれの基線長 [m]を以下の表にまとめる。

基線組み合わせ	略称	基線長 [m]
日立-高萩	HT	259.4
日立-鹿島	HO	82336.6
高萩-鹿島	TO	82459.2
鹿島-山口	OK	851297.9
日立-山口	HK	872668.0
高萩-山口	TK	872922.3

表4.5 基線長と名称

これらの基線名のもとでPCで解析を行う。解析には複数のプログラムを実行する必要があり、それぞれについて説明する。

apri_calc ; アプリオリ(予測値)ファイルの作成

相関処理したい二局の以下のデータ

(1)観測スケジュール

(2)位置情報

(3)周波数グループ

(4)周波数チャンネル

(5)クロックオフセット：アンテナ二局で使用している時刻基準のズレ

(6)クロックレート：アンテナで使用している時刻基準の変化率のズレ

を用いて観測時における遅延時間とその1階、2階、3階微分を求めるプログラム。これらの結果が書かれたファイルをアプリオリファイルと呼ぶ。

`fx_cor`；フリッジサーチ

アプリオリファイルから遅延時間差を求めるプログラム。

(1)tlpp：相関処理を行う前にある程度の積分を行うことによってSNRを向上させてフリッジを検出する。その積分時間。

(2)積分時間：データの総積分時間(最大300秒)

(3)クロックオフセット：各局同士における遅延時間

(4)時間差サーチ範囲：スペクトルにおけるチャンネル数。これはフリッジを探索する2局の時刻差の範囲に相当する。

を設定することが可能。

`sdelay`；粗決定サーチ

相関係数が最大になる遅延時間や遅延時間差を求めるプログラム。以下のオプションをつけることによってさまざまな出力結果を得ることが可能。

-fringe：フリッジを出力(PPごとの位相と強度をプロット)

-vspeplot；ビデオスペクトルを出力(周波数ごとの位相と強度のプロット)

-vspeout；ビデオスペクトルの値(周波数ごとの位相と強度)をファイルとして出力する

この粗決定サーチによりdelay (遅延残差), rate (遅延残差の変化率), SNR (signal noise ratio)を出力することができる。本研究ではSNRの基準値を10とし、それ以上のSNRを得ることができれば二局の間で相関がとれていると判断した。

◇相関処理の流れ◇

1. キャリブレーター三天体に対してapri_calc, fx_cor, sdelayを実行し、クロックオフセット,クロックレートの量を計測する。
2. 1の解析で求められた三天体のクロックオフセット,クロックレート値の平均を取る。
3. 2で求めた値をapri_calcのクロックオフセット,クロックレートの初期値として設定し、メタノールメーザー源56天体のデータに対してfx_cor, sdelayを行うことで遅延補正を行う。SNR値と出力されたスペクトルの位相図, 振幅図から遅延補正と相関がとれているかを判断し、SNRが最大になるオフセットとレートを求める。

第5章

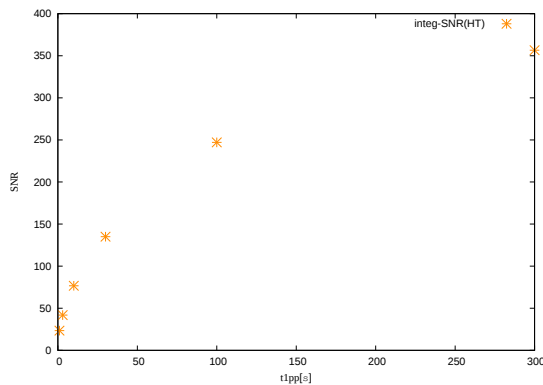
結果・考察

この章では各基線の相関処理における解析結果と visibility-plot から考えられる天体の放射領域サイズについての考察を記述する。

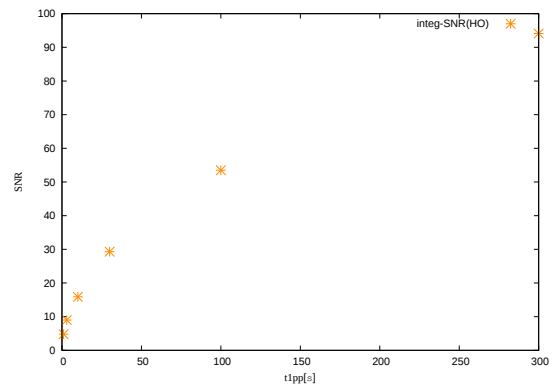
5.1 各パラメータの最適値の決定

5.1.1 積分時間と信号雑音比の評価

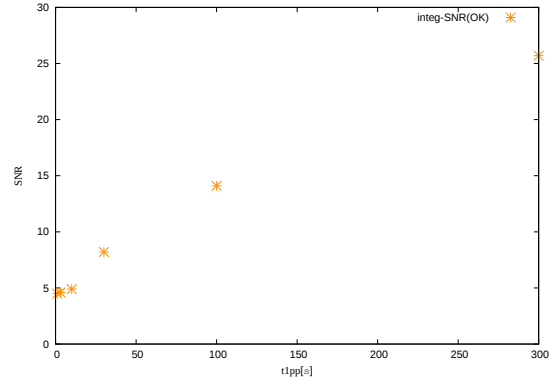
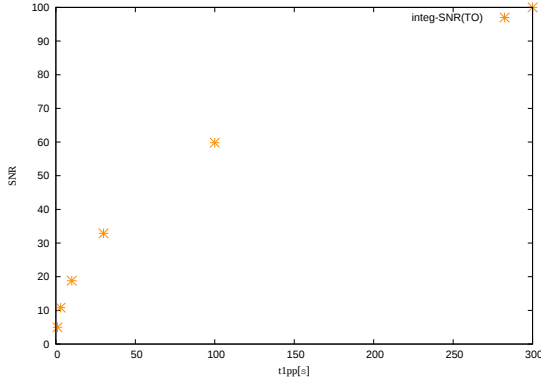
まず積分時間の最適値を決定するために、観測時間300秒に対して積分時間と信号雑音比(SNR)の変化についての評価を行った。キャリブレーター天体:NRAO512の全基線における積分時間とSNRの関係についてのグラフを以下に記載する。積分時間は1秒, 3秒, 10秒, 30秒, 100秒, 300秒と変化した。



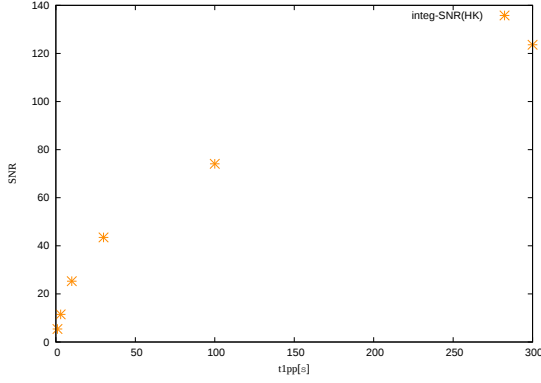
[1] 日立-高萩基線における integ-SNR 図



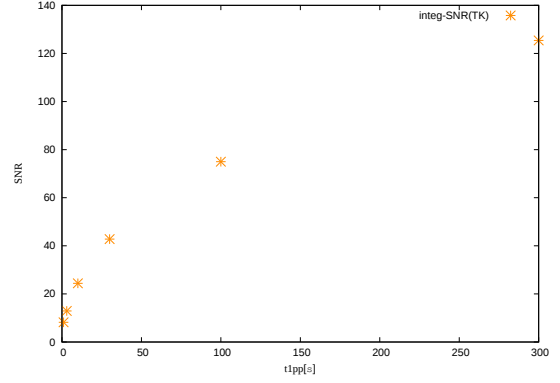
[2] 日立-鹿島基線における integ-SNR 図



[3]高萩-鹿島基線におけるinteg-SNR図



[4]鹿島-山口基線におけるinteg-SNR図



[5]日立-山口基線におけるinteg-SNR図

[6]高萩-山口基線におけるinteg-SNR図

全基線において積分時間を長くするほどSNRの値が大きくなることがグラフから見て取れる。また信号雑音比の理論式は以下のように表される。

$$\text{SNR} = \alpha \frac{T_{cmb}}{T_{sys}} \sqrt{Bt} \quad (5.1)$$

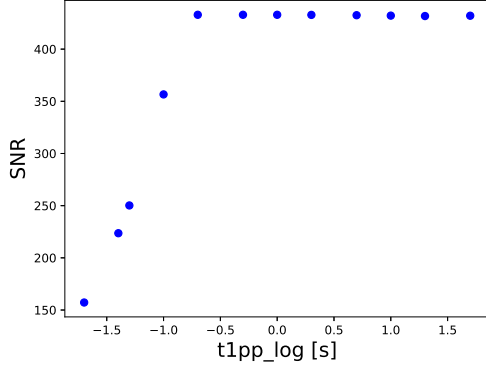
ここで、 T_{cmb} は宇宙背景放射の温度、 T_{sys} はシステム雑音温度、 B は観測帯域幅、 t は積分時間である。本研究で使用している相関処理ソフトでは以下の式のようにSNRを導出している。

$$\text{SNR} = r \times \sqrt{2Bt} \quad (5.2)$$

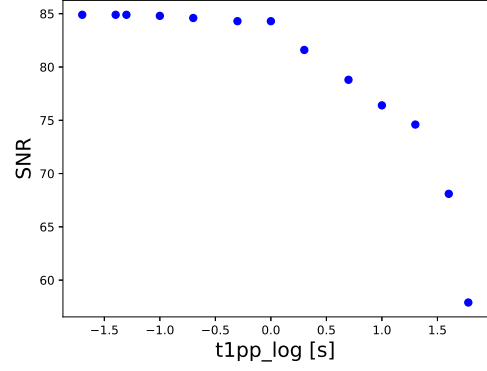
ここで r は相関強度である。以上から、本解析結果は式(5.1) (5.2)と一致していると考えられる。観測時間全体である300秒で積分することで高いSNR値を得ることができると考えられる。この後に実行するメタノールメーザー天体の解析においては300秒で積分を行う。

5.1.2 t1ppとSNR

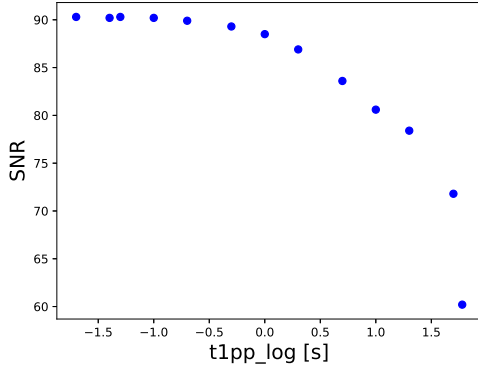
次にt1ppの最適値を決定するために、t1ppとのSNRの変化について調べた。t1ppとはフリンジサーチの際に積分を行う単位時間のことである (§4.2)。較正天体NRAO512のデータに対して、積分時間は各基線において240秒としt1ppの値を0.02, 0.04, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50 (HOのみ40), 60 (HTのみ100)として変化させた。SNRを縦軸、対数をとったt1ppを横軸としてプロットしたグラフを以下に示す。



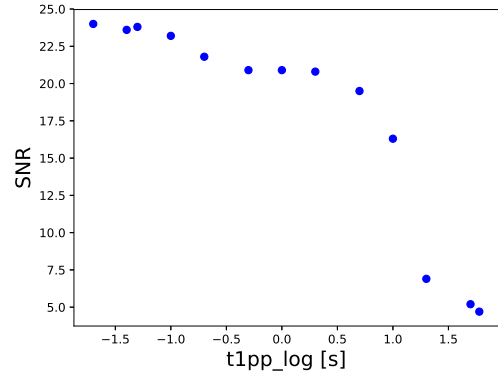
[1] 日立-高萩基線におけるt1pp-SNR図



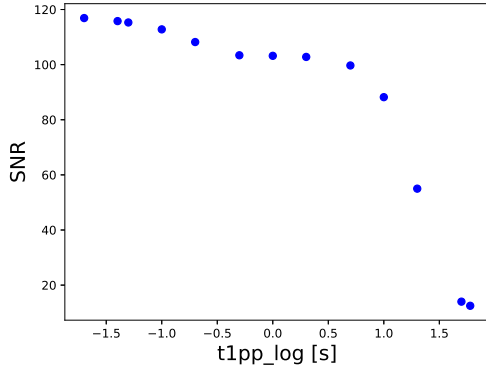
[2] 日立-鹿島基線におけるt1pp-SNR図



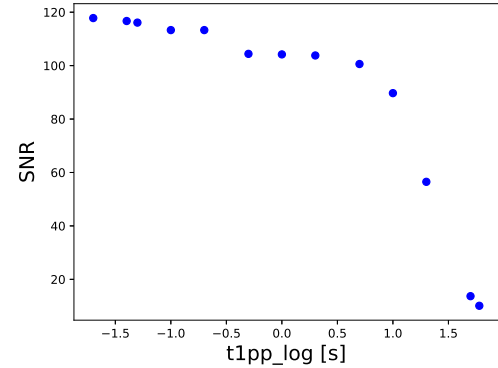
[3] 高萩-鹿島基線におけるt1pp-SNR図



[4] 鹿島-山口基線におけるt1pp-SNR図



[5] 日立-山口基線におけるt1pp-SNR図



[6] 高萩-山口基線におけるt1pp-SNR図

グラフから、t1ppの値を上げていくと一定の値まではSNRが上昇したあと減少する傾向を読み取れることができる。SNR値が最大になるのは全基線においてt1pp = 1のときであることがわかった。SNR値が10以上かつ、SNR値が減少しないt1pp値はt1pp = 1であることから今後のメーザー天体の解析ではt1pp値 = 1を解析の基準として設定し相関処理を行うこととする。

5.1.3 幾何学的遅延時間

メーザー天体の幾何学的遅延補正に必要な遅延予測をキャリブレーションのデータを用いて決定する。キャリブレーションであるNRAO512データ (観測データ DOY 300:02:30:00, 02:35:30, 02:41:00, 02:46:30), DA193データ(15:55:00, 16:00:30, 16:08:00, 16:09:20), 4C39.25データ(17:02:00, 17:07:30, 17:13:00, 17:18:30)を用いて遅延時間の予測を行った。まず各データを10秒で積分し遅延時間を予測する。予測した遅延時間を300秒積分の解析における補正值として使用し遅

延時間がどの程度補正できているかを判断する。以下に各基線ごとのクロックオフセット値, レート値をそれぞれまとめる。

	HT		HO		TO		OK		HK		TK	
	offset(μ s)	rate(ps/s)	offset(μ s)	rate(ps/s)	offset(μ s)	rate(ps/s)	offset(μ s)	rate(ps/s)	offset(μ s)	rate(ps/s)	offset(μ s)	rate(ps/s)
4C39.25	2.532	-0.0675	-5.146	-0.908	-7.678	-0.903	8.958	5.747	3.813	4.840	1.281	4.845
DA193	2.532	-0.021	-5.142	-1.009	-7.674	-0.976	8.969	4.279	3.827	3.274	1.294	3.304
NRAO512	2.532	0.015	-5.090	-1.052	-7.621	-1.060	8.871	5.244	3.782	4.187	1.25	4.164

表5.1 各基線ごとのoffset, rate

これを棒グラフにしたのが以下の図である。

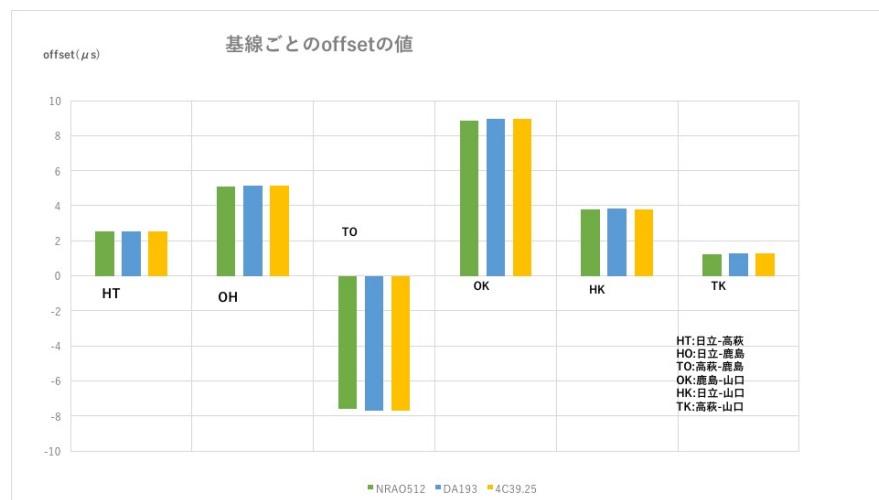


図5.1 各基線ごとのoffset値

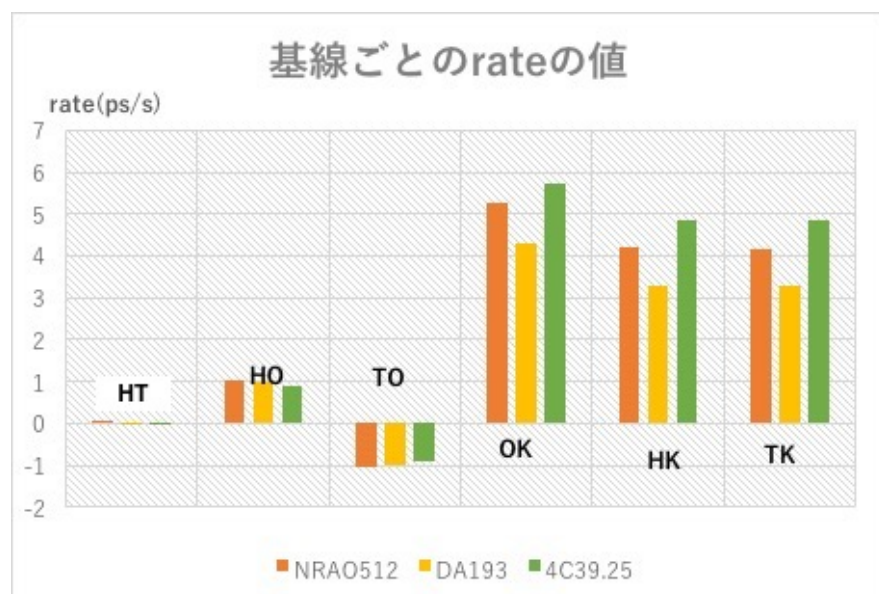


図5.2 各基線ごとのrate値

各基線ごとにキャリブレーションのoffset値はおおよそ一定になっている。一方で、rateの値は鹿島-山口, 日立-山口, 高萩-山口基線において較正天体DA193の値が他の天体に比べて低い値となっていることがわかる。ここから5つのことが考えられる。

1. offsetは正しく求められている。
2. 同一基線の場合、さまざまな観測時刻に行われた3天体の観測結果から得られた予測値(offset, rate)がほぼ同一であったことから予測値の時間変化は無視できる。すなわち、較正天体の解析で得られた予測値を、他の時刻に行なったメタノールメーザーの解析結果の解析の初期値として使用できる。
3. 長基線において較正天体DA193のrateが他の2天体と異なる原因として、DA193の構造が広がっている可能性がある
4. 長基線において、rateが大きい原因として、山口局の時計(水素メーザー)が不安定である可能性が考えられる
5. 長基線において、rateが大きい原因として、相関処理で用いた山口局の位置(X, Y, Z)が真の値からずれていた可能性がある

キャリブレーターは長基線においても分解しない天体を選出したはずであったが、予想に反してDA193では構造が見えてしまっている。よってDA193の遅延残差を補正することはできないと判断し、rateの平均値を求める際には使用不可とした。つまりrateに関してはキャリブレーター2天体分のデータ（計8データ）の平均値を使用する。

5.1.4 バンドパス

干渉計観測を行ったキャリブレーター(NRAO512, DA193, 4C39.25)の自己相関(日立 - 日立)におけるデータを用いてバンドパスを評価した。キャリブレーター三天体におけるデータ（全部で12データ存在するが、積分時間が60秒の2つを除いた計10データ）を用いて周波数-強度のグラフを作成しバンドパスを求めた。10データのパラメーターは $t_{1pp} = 1, 300$ 秒積分、分光点数8192点として、IF周波数が0以上の領域に対してプロットを行った。これは0より小さい周波数領域での強度が0であることから表示する必要がないからである。その後、10データの強度を平均することで平均バンドパスを求めた。以下に自己相関(日立 - 日立)における平均バンドパスを示す。

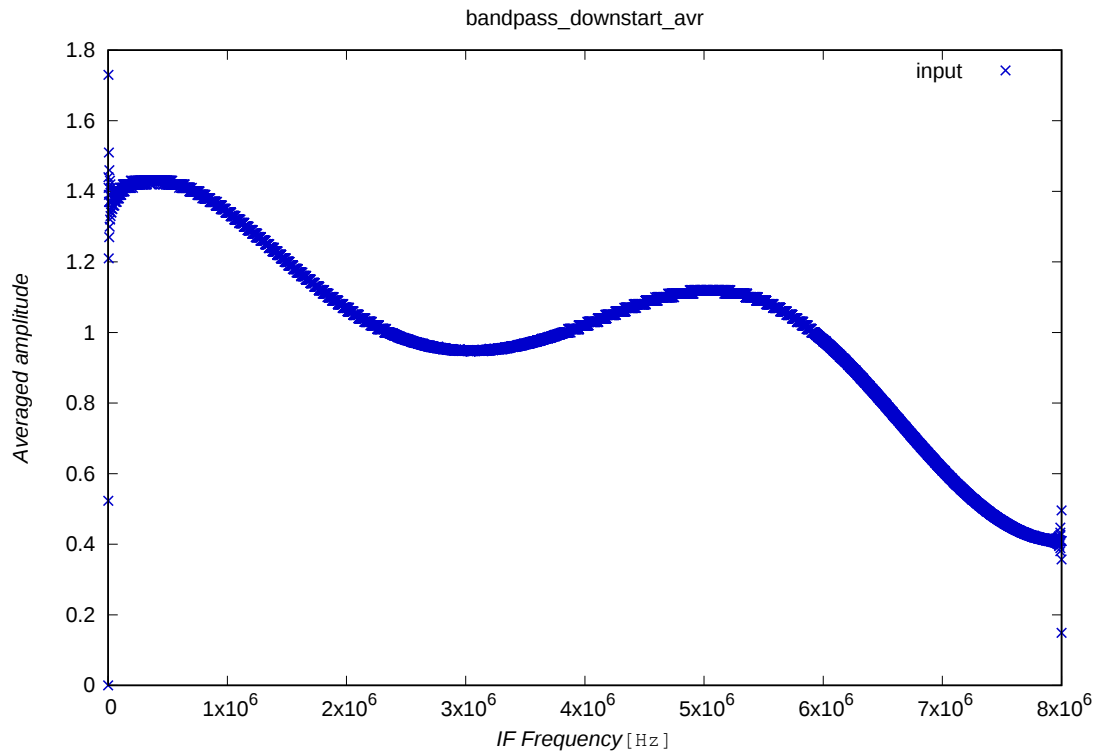
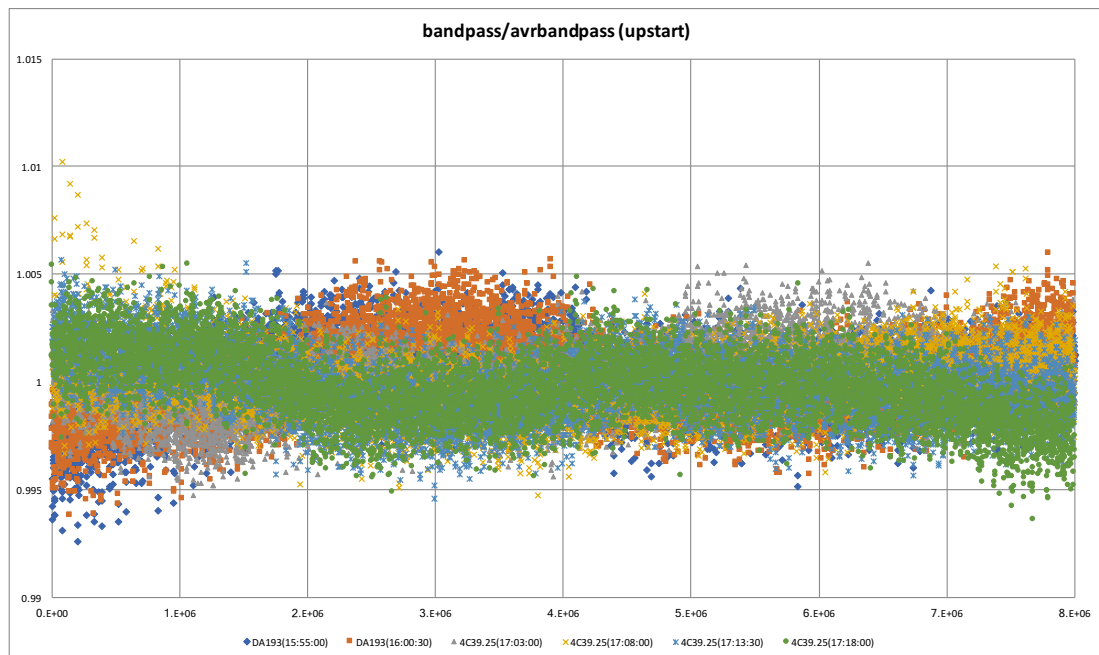


図5.3 自己相関(日立 - 日立)における平均バンドパス

この平均バンドパスを用いて元の10データを規格化したところ、

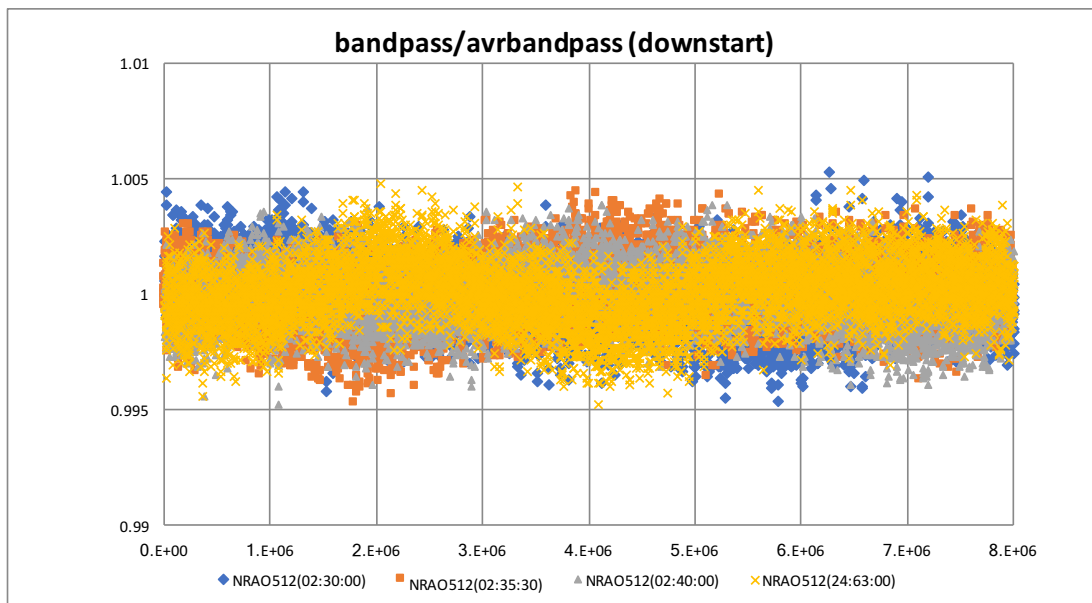
- (1) 正の値から下降する形状 (4データが該当)
- (2) 負の値から上昇する形状 (6データが該当)

の二つのグループに分けることができることがわかった。それぞれについてのグラフを以下に示す。



[1]bandpass/平均bandpassしたデータのうち、上昇から始まるものをプロットした図

図5.4 グラフの形状から二つのグループに分類されたbandpass



[2]bandpass/平均bandpassしたデータのうち、下降から始まるものをプロットした図

図5.5 グラフの形状から二つのグループに分類されたbandpass

それぞれのグラフにおいて使用しているデータの平均値 = 1.000からのズレはdownstart, upstartの両方で 0.995 ~ 1.005であり、それぞれ $\pm 0.5\%$ 以内、 $\pm 1\%$ 以内であった。

5.2 メタノールメーザー天体の解析結果

これまで述べたclock offset, 積分時間, t1ppを用いて、メタノールメーザー天体に対してフリンジサーチを行うことで各基線において遅延補正を行い天体の放射を検出した。各基線における信号のフリンジ検出の判断基準は $\text{SNR} = 10$ 以上とした。結果として得られた検出率は以下の通りである。

観測基線	HT	HO	TO	OK	HK	TK
検出天体数	56	21	17	3	17	17
検出率	100%	37%	30%	5%	30%	30%

表5.2 各基線におけるフリンジ検出率

各基線、天体ごとのdelay, rate, SNR値についてはappendix Aに記載した。検出率はHTが一番高く、OKが一番低くなっていることがわかる。この結果はシステム雑音温度が低い観測局と相関をとるほど、検出率が高いと理解される。日立局、高萩局のシステム雑音温度はともに30 [K]である一方、鹿島局は150 [K]、山口局は110 [K]であったことからOKにおける一番低い検出率が説明できる。だがこの段階で行なっている検出・非検出の判断は相関信号のSNRによるものであり、天体信号のピーク放射が検出できたかどうかは後述するベースラインフィット後で考えていく。

5.2.1 09.62+0.196

まず最初に非常に強いフラックス値を持つ09.62+0.196についての結果を示す。(以下、図中では9.621+01と表記する)

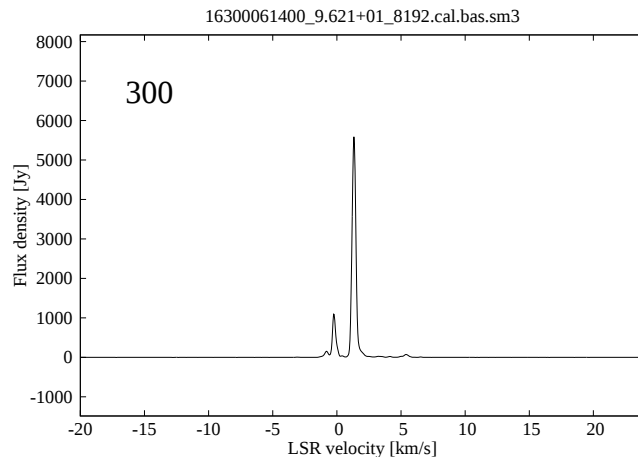
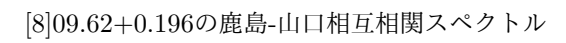
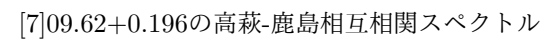
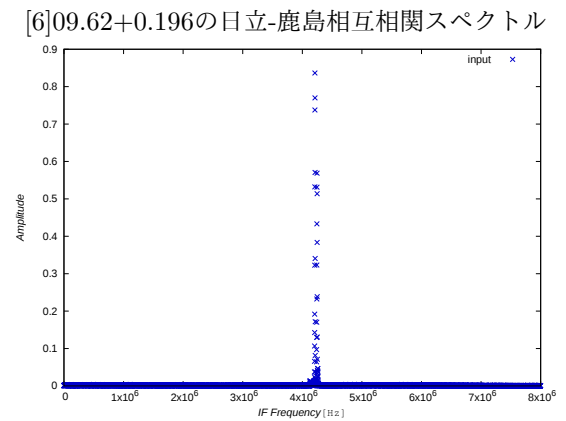
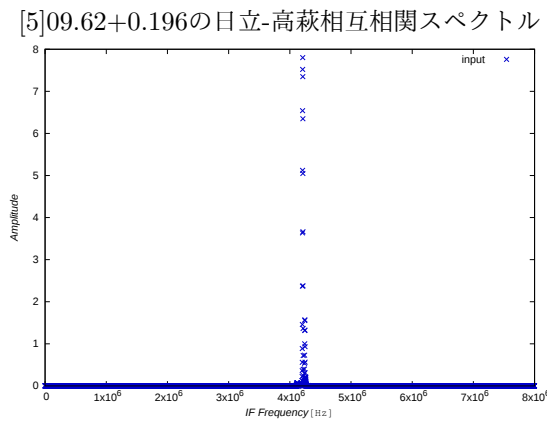
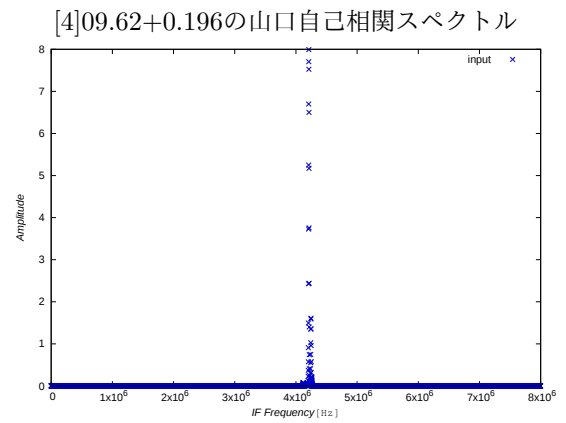
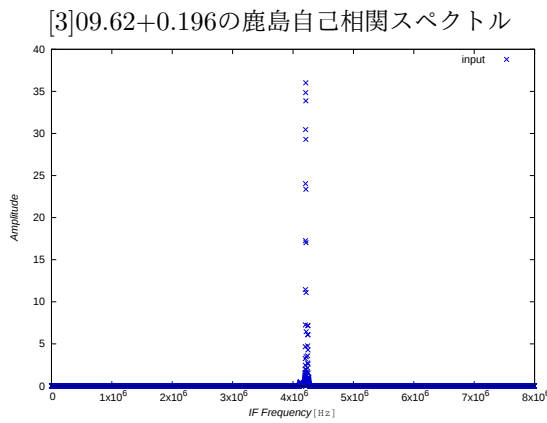
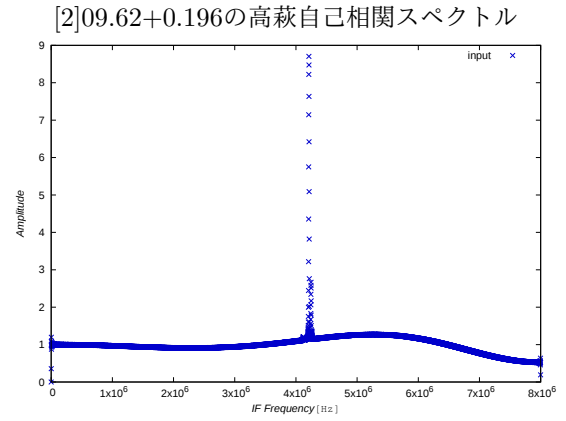
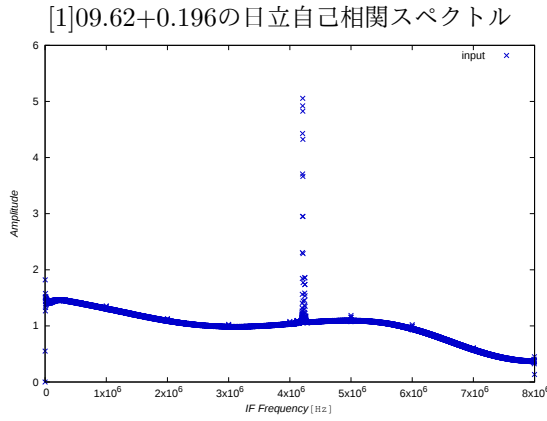
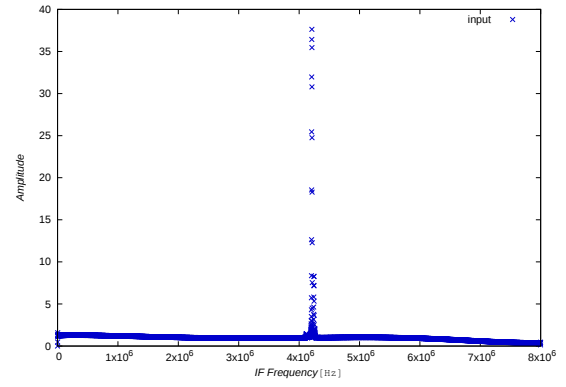
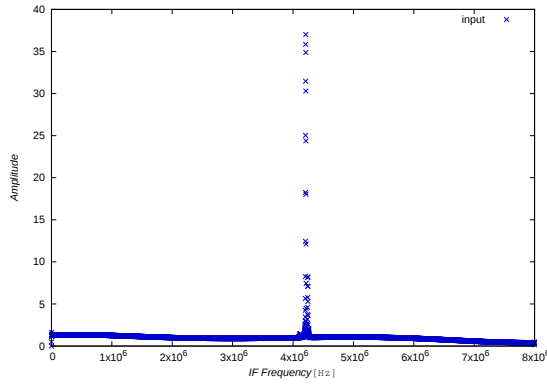
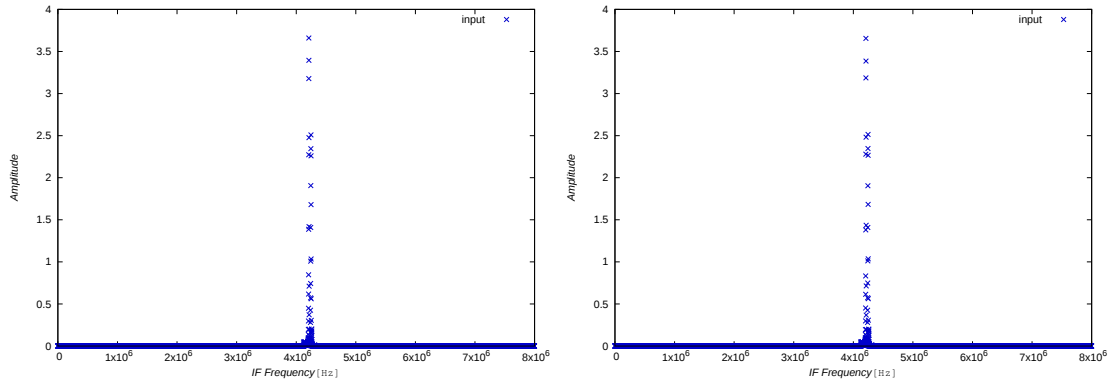


図5.6 日立単一鏡観測で得られたG009.62+0.19のスペクトル図

日立単一鏡観測では $V_{\text{lsr}} = 2\text{km/s}$ 付近でtotal flux 約6000[Jy]という非常に強いメーザー放射を検出することができている。次に各局, 各基線における相関処理で得られた自己相関スペクトル, 相互相関スペクトル図を示す。





[9]09.62+0.196の日立-山口相互相関スペクトル [10]09.62+0.196の高萩-山口相互相関スペクトル

全てのスペクトルでIF周波数約4.2MHzでメーザー放射を検出しており、単一鏡スペクトルのメーザー放射の視線速度 V_{LSR} と一致している。^{*1}天体サイズを推定するのに用いるvisibility-plotを作成するには、各スペクトルにおけるピーク放射の強度が必要となる。スペクトルを見ると相互相関スペクトルは大気の影響などを受けないことからベースラインがフラットになっているが、自己相関スペクトルはそうではないことがわかる。そこで自己相関スペクトルに対しては二つの手順でキャリブレーションを行なった。次にその手順について示す。

キャリブレーション1：bandpass

1つ目のキャリブレーションにはbandpassを用いる。§5.1.4で記述した通り、bandpassの形状には二つの種類があることがわかっている。このキャリブレーションではfluxが0から下がり始めるdownstart型のバンドパス(4データ存在)の平均を使用する。以下にdownstart型の平均バンドパスを示す。

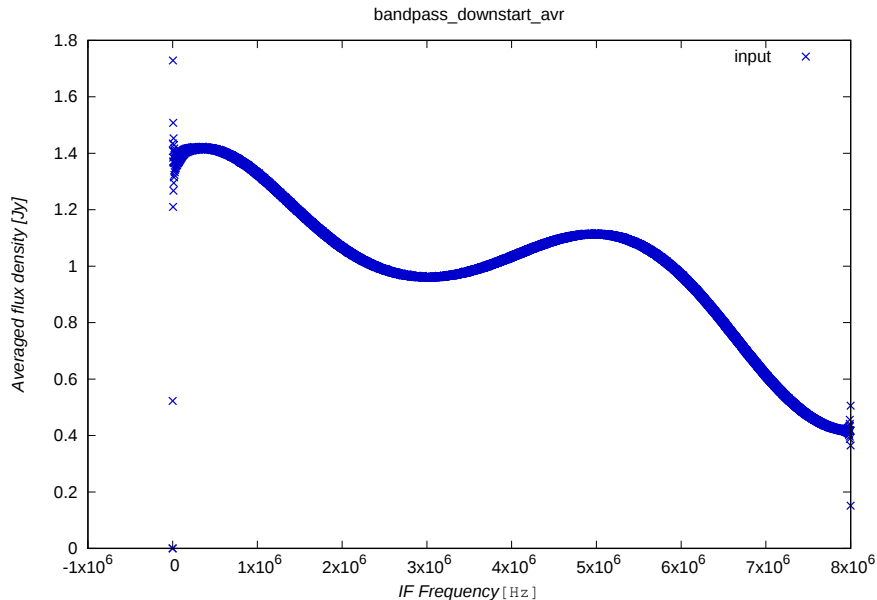
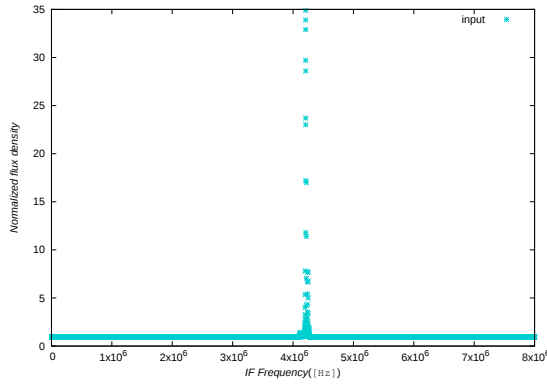


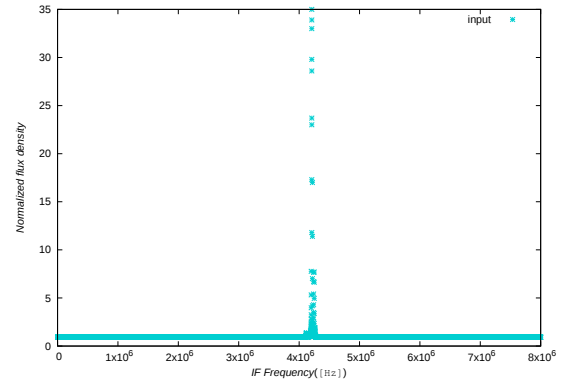
図5.7 downstart型の平均bandpass

方法としては各局の自己相関スペクトルにおける天体の強度とdownstart型のbandpass平均強度との比をとることで補正を行った。

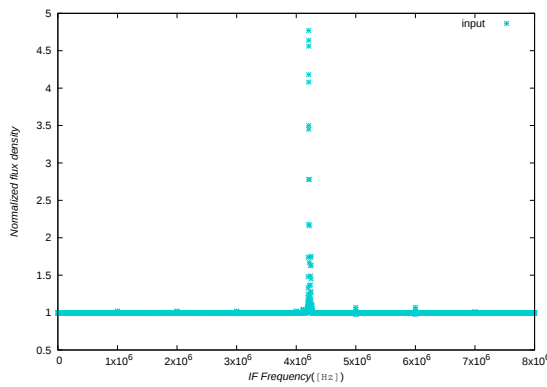
^{*1} 視線速度とIF周波数の変換はappendix Dに記載



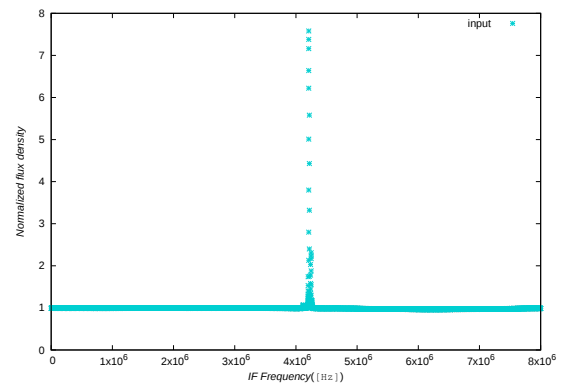
[1] 日立自己相関スペクトル
(bandpass calibrated)



[2] 高萩自己相関スペクトル
(bandpass calibrated)



[3] 鹿島自己相関スペクトル
(bandpass calibrated)



[4] 山口自己相関スペクトル
(bandpass calibrated)

図5.8 09.62+0.196の自己相関スペクトルをバンドパス(downstart)で規格化した図

このキャリブレーションによって、スペクトル全体のベースラインがフラットになったことがわかる。ただこれらのスペクトルを拡大すると、狭い周波数領域ではbandpassの影響が残っていることがわかった。またベースラインはフラットだが、強度が0にすることはできない。ベースライン強度を0にするために、次のキャリブレーションであるbaseline-fitを行う。

キャリブレーション2 : baseline-fit

ベースラインを0まで下げるために関数近似によるbaseline-fitを行なった。方法としては、まずメーザーのピーク放射を検出している周波数幅をグラフから読み取る。次にその周波数幅と同じ幅をメーザー放射の両端にとり、メーザー放射を切り抜いた上でfluxを一次関数で近似する。この一次関数をメーザー放射を含む全周波数領域に適用し、得られた各周波数における強度を差し引くというのがbaseline-fitである。

例として09.62+0.196におけるピーク放射の周波数幅を記載する。ここでは全局でピーク放射を同じ周波数幅とし、小数点以下二桁までの値を読み取ることとする。^{*2}

^{*2} RF周波数をドップラー効果を用いて変換した値である。自転や公転による影響は加味していない

	IF frequency[MHz]	RF frequency[MHz]	V_{lsr} [km/s]
メーザー放射	4.00 - 4.40	6667.60 - 6668.00	-17.8 - -0.18
baseline (left)	3.60 - 4.40	6667.60 - 6668.00	-35.7 - -17.8
baseline (right)	4.40 - 4.80	6667.60 - 6668.00	-0.18 - 18.2

表5.3 09.62+0.196のピーク放射における周波数幅と視線速度

この周波数幅でbaseline-fitを実行した後の各局の自己相関スペクトルを以下に示す。

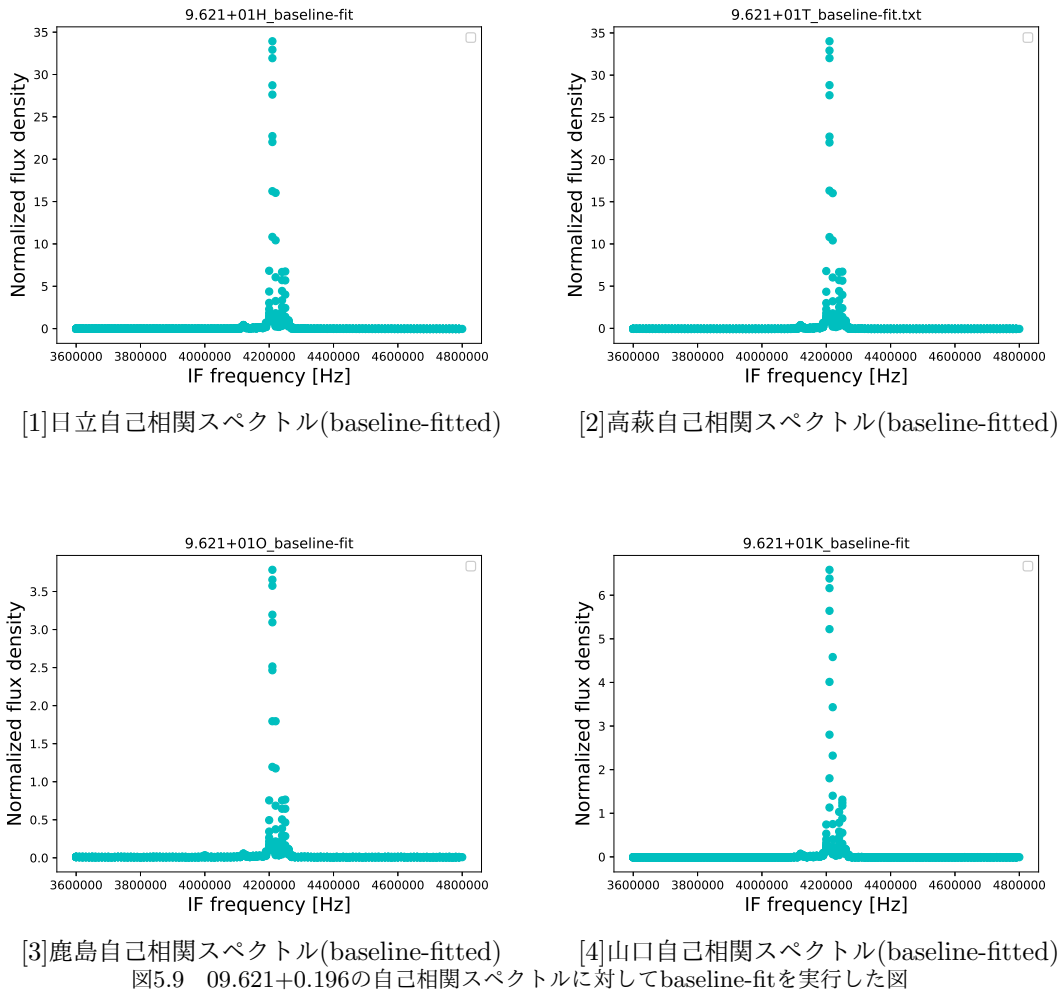


図5.9 09.621+0.196の自己相関スペクトルに対してbaseline-fitを実行した図

このキャリブレーションによってメーザー放射範囲におけるベースラインをフラットかつ0近傍まで下げることができたことがわかる。これによって、自己相関スペクトルにおけるメーザー放射のピーク放射強度を抽出することができた。

相互相関振幅値のキャリブレーション

これまで自己相関スペクトルのキャリブレーションについて説明してきたが、ここでは相互相関振幅のキャリブレーションについて説明する。各基線の相互相関振幅のキャリブレーションには基線に対応する観測局の自己相関振幅値を用いる。この自己相関振幅値というのが、一つ前のセクションで求めたbaseline-fit後のピーク強度のことである。本研究では以下の式を用いて相互相関振

幅のキャリブレーションを行う。

$$\text{corflux}_{\text{cal}} = \frac{\text{corflux}_{12}}{\sqrt{\text{autoflux}_{1\text{cal}} \times \text{autoflux}_{2\text{cal}}}} \quad (5.3)$$

ここで

$\text{corflux}_{\text{cal}}$: キャリブレーション後の相互相関振幅

corflux_{12} : キャリブレーション前の相互相関振幅

$\text{autoflux}_{1\text{cal}}$: 観測局 1 の自己相関振幅 (bandpass補正およびbaseline-fit実施後)

$\text{autoflux}_{2\text{cal}}$: 観測局2の自己相関振幅 (bandpass補正およびbaseline-fit実施後)

とする。この式を厳密に書くと以下のようなになる。^{*3}

$$\text{visibility} = \alpha' [\text{nodimension}] \times \frac{\text{corflux}_{12}}{\sqrt{\frac{\text{autoflux}_{1\text{cal}}}{\text{bandpass}_1} \times \frac{\text{autoflux}_{2\text{cal}}}{\text{bandpass}_2}}} \quad [\text{Jy}] \quad (5.4)$$

さらに、本研究では観測局の偏波の違いも補正する必要がある。日立局, 高萩局, 山口局は円偏波であるが、鹿島局は垂直偏波であることを考慮すると鹿島局を含む基線における相互相関振幅は補正ファクターとして $\sqrt{2}$ 倍をする必要がある。

$$\text{corflux}_{\text{cal}} = \frac{\text{corflux}_{12}}{\sqrt{\text{autoflux}_{1\text{cal}} \times \text{autoflux}_{2\text{cal}}}} \times \sqrt{2} \quad (5.5)$$

uv-distanceの計算

3章で記載したとおり、uv-distanceは[アンテナの緯度, 経度], [基線長], [天体の Az, El]を用いて計算することができる。これまで解析を進めてきた09.621+0.196 の Az, El は観測時におけるログデータから300秒の間における値を使用する。そのときの Az, El は以下の通りである。

$$AZ = 177.866^\circ, El = 32.786^\circ$$

この値を用いて計算した各基線における基線長とuv-distanceを以下に示す。

	HT	HO	TO	OK	HK	TK
基線長 [m]	259.437	82336.623	82459.235	851297.965	872668.367	872922.367
uv-distance [m]	243.746	71921.958	72045.007	663267.059	691567.698	691777.356

表5.4 各基線長とuv-distance

この結果を見ると元の基線長に対してuv-distanceの方が距離が短くなっているのがわかる。uv-distanceは時々刻々変化するため、各時間に対応する Az, El を使えば、対応する距離を求めることができるが、本研究の観測時間内の変化は小さいので、すべての天体で観測時間の中間における角度を使用した。

Visibility-plotの作成

キャリブレーション後の自己相関振幅と相互相関振幅、観測時の Az, El から導出したuv-distanceを用いてvisibility-plotを作成した。以下に09.621+0.196のvisibility-plotを示す。

^{*3} appendix F参照

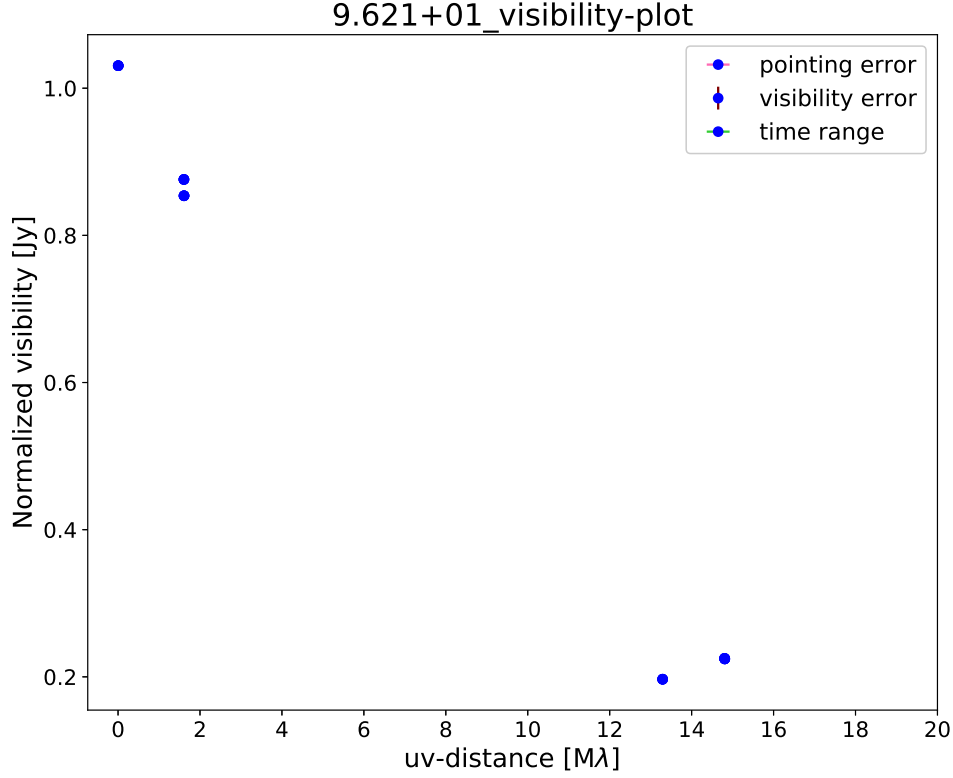


図5.10 09.621+0.196のvisibility-plot

縦軸のerror barは各局の自己相関スペクトルにおけるrmsを用いて評価した。以下に誤差伝搬の式を示す*4。

$$S + dS = \alpha' \times \frac{\text{corflux}_{12} + \text{rms}_{12}}{\left(\sqrt{\frac{\text{autoflux}_{1\text{cal}}}{\text{bandpass}_1} + \text{rms}_1} \right) \times \left(\frac{\text{autoflux}_{2\text{cal}}}{\text{bandpass}_2} + \text{rms}_2 \right)} \quad [\text{Jy}] \quad (5.6)$$

式(5.6)から誤差dSは以下のように表される。

$$dS = \frac{\text{corflux}_{12}}{\sqrt{\text{autoflux}_1 \times \text{autoflux}_2}} \left(\frac{\text{rms}_{12}}{\text{corflux}_{12}} - \frac{1}{2} \frac{\text{rms}_1}{\frac{\text{autoflux}_{1\text{cal}}}{\text{bandpass}_1}} - \frac{1}{2} \frac{\text{rms}_2}{\frac{\text{autoflux}_{2\text{cal}}}{\text{bandpass}_2}} \right) \quad [\text{Jy}] \quad (5.7)$$

横軸は二種類のerror barをプロットしている。

一つはアンテナのpointing errorに起因するuv-distanceの誤差である。これはアンテナをどれだけ正確に対象に対して向けられるかという指標である。本研究では主ビーム（日立32mアンテナで4.6分角）の1/2以上ずれていないことを仮定し、3分角*5の誤差として推定を行なった。使用するデータは09.621+0.196の5分観測の中間におけるAz, Elとして、それぞれに± 0.05 [deg]を付加してuv-distanceを計算し平均をとったものである。以下に各pointingのズレにおけるuv-distanceの誤差をまとめる。

*4 visibility-plotに使用する相互相関振幅の計算はappdixFを参照

*5 3分角は弧度法では0.05度に相当する

	uv-distance error($Az \pm 0.05^\circ$ のpointing error)	uv-distance error($El \pm 0.05^\circ$ のpointing error)
HT	$\pm 1.419\text{e-}06$ [M λ]	$\pm 3.915\text{e-}07$ [M λ]
HO	$\pm 1.199\text{e-}05$ [M λ]	$\pm 2.834\text{e-}04$ [M λ]
TO	$\pm 9.738\text{e-}06$ [M λ]	$\pm 2.838\text{e-}04$ [M λ]
OK	$\pm 2.254\text{e-}03$ [M λ]	$\pm 2.941\text{e-}03$ [M λ]
HK	$\pm 3.033\text{e-}03$ [M λ]	$\pm 2.571\text{e-}03$ [M λ]
TK	$\pm 3.024\text{e-}03$ [M λ]	$\pm 2.571\text{e-}03$ [M λ]

表5.5 pointing errorに起因するuv-distanceのerror

誤差値が小さいことから、放射領域サイズの推定には影響がないと考えられる。今後、全天体で指向誤差は一律としてerror barをつけることとする。

二つ目は観測時間に相当するuv-distanceのrangeである。観測時間(300秒)中で天体の Az, El を用いてuv-distanceの最大, 最小値を導出した。この範囲は各天体において Az, El が異なるため全天体で異なる値となる。この天体の場合には、最短基線でerror = 0.00, 最長基線で $8.680\text{e-}02$ [M λ]と求められた。pointing errorに起因するuv-distanceのerrorと比較すると誤差は大きい⁶が、visibility-plotの形状に影響を与えることはないと考えられる。以下に基線ごとのtime rangeに起因するuv-distanceのerrorをまとめる。

	time rangeに起因するuv-distanceのerror [M λ]
HT	± 0.00
HO	$\pm 5.482\text{e-}04$
TO	$\pm 4.851\text{e-}04$
OK	$\pm 6.546\text{e-}02$
HK	$\pm 8.675\text{e-}02$
TK	$\pm 8.680\text{e-}02$

表5.6 time rangeに起因するuv-distanceのerror

解析の結果、 $09.621+0.196$ では縦軸に対する誤差は小さいこと、長基線ではrangeによるerror barが大きくなっていることがわかる。またグラフのプロットでuv-distanceが長くなるにつれ、visibilityが小さくなっていることから、長基線では天体の構造が分解しているということである。ただし、uv-distance = $2 \sim 14$ [M λ]となるプロットがないことからグラフの正確な形状を読み取ることは難しかった。

これらの点を踏まえつつも、追観測によりグラフの変化を探る追観測は有意義だと考えられる。

放射領域サイズの計算

グラフの正確な形状を予測することはできないが、visibility-plotに対してフィッティングを行うことで放射領域サイズを推定することができる。本研究ではガウス関数とsinc関数の二つの関数でフィッティングを行なった。

Gaussian-fitでは1成分のガウス関数^{*6}

$$V(u) = A \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.8)$$

^{*6} 一般的なガウス関数は $a \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right)$ であるが、本研究では $x = 0$ のときに $V(u)$ が最大値をとるため、 $b = 0$ とした

でfittingをしたが、うまくfitできなかった。そこで2成分のガウス関数でfitすることにした。

$$V(u) = A \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) + \alpha \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.9)$$

でfitするべきところであるが、簡単のため

$$V(u) = A \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right) + \alpha \quad (5.10)$$

でfitする事とした。半値幅は以下のように表せる。

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2} \cdot \sigma \quad (5.11)$$

A, σ, α は任意とした。なお式(5.10)は式(5.9)において σ^2 が u の取りうる範囲よりも非常に大きい $u \gg \sigma^2$ のときに $\alpha = A/2$ となる。したがって、 σ がuv-distanceの最大値(観測天体によって異なるが、約15 [Mλ])よりも大きい、つまり、 σ の下限値が推定できるということになる。強度分布がcoreとhaloの成分を持つと仮定した場合に、coreの構造を分解するためにはより長基線での観測を行う必要がある。このfittingでは α の値をcoreに相当するフラックスとした。これにより、coreとhaloのフラックス比だけでなく、coreに関するサイズの上限を推定することができると考えられる。本解析ではpythonプログラムのcurve fitモジュールを使用し、fittingを行なった。visibility-plotの形状をgaussianで仮定すると、そのgaussianをフーリエ変換した天体の輝度分布もまたgaussianであることを利用した。を以下のように定義した

sinc-fitのsinc functionを以下のように定義する。^{*7}

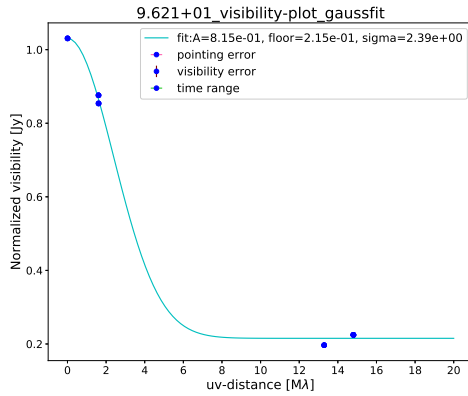
$$\text{sincfunction} = \frac{\sin(Bx)}{x} \quad (5.12)$$

このときのnull pointは以下ようになる。

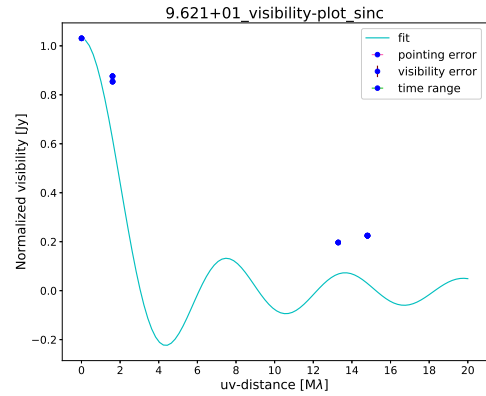
$$x = \pm \frac{n\pi}{B} \quad (n \text{ は整数}) \quad (5.13)$$

今回は簡単のため、 $n=1$ 、 B を任意としてfittingを行なった。このときサイズに対応する値をnull pointとしてサイズの計算を行なった。

以下がそれぞれフィッティング後のvisibility-plotである。



[1]09.621+0.196のvisibility-plot
(Gaussian - fit)



[2]09.621+0.196のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

^{*7} B はscale factor

このフィッティングにより gaussian fitting の FWHM = 5.61 [M λ]*⁸ と求められた。一方、sinc function の null point = 3.04 [M λ] であった。

ここからサイズの導出に入る。FWHM の逆数は以下のように表せる。

$$\theta \simeq \frac{1}{\text{FWHM}} \simeq \frac{\lambda}{D} \quad [\text{rad}] \quad (5.14)$$

この値を天体の見かけのサイズとし、天体までの距離が kinematic distances では、 $d = 5.2 \pm 0.6$ [kpc] (Sanna et al. 2009) であることを用いて放射領域サイズ R の計算を行なった。結果として $R(\text{halo}) = 190 \pm 22$ [au] (gaussian - fit) であると求まった。また $R(\text{core})$ の上限値は FWHM = 14.72 [M λ] とすると、 72 ± 8 [au] と見積もられる。

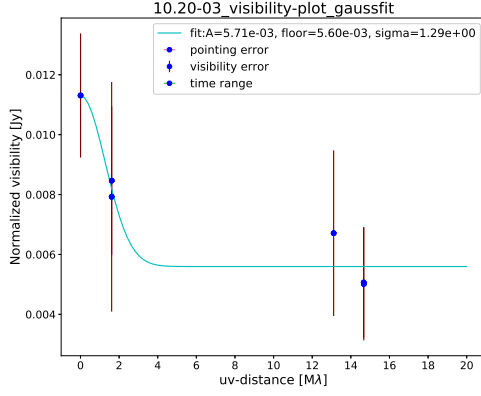
この結果を用いて天体の放射領域サイズと Core, Halo の関係について考える。gaussian-fit のグラフでは、全プロットと fitting が一致していると考えられる。これは天体の輝度分布を halo に相当する gaussian と core に相当するパラメーター α で fitting しているからだと考えられる。このように、halo のサイズ推定には gaussian の FWHM を、core には HK や TK の uv-distance を用いること導出できると考えられる。gaussian-fit から halo のサイズは約 190 au ということになる。同天体のサイズを推定した Minier et al. (2002) による各 knot において Halo のサイズは 50 ~ 280 [au] であることから、本解析で求めた結果と一致すると考えられる。また core の上限サイズは同様の計算により $R(\text{core}) > 72.86$ [au] と導出でき、Minier et al. (2002) で提唱されている core のサイズ (2.8 ~ 19.9) を含んでいる。このことから、本解析でメタノールメーザースポットの core, halo のサイズを推定することができたと考えられる。sinc function-fit のグラフでは、フィッティングとプロットでは合致していない。つまり、スポットの形状は一樣輝度の箱型関数では表せないと考えられる。ただし、今回のフィッティングでは null 点を π としており、より複雑な関数 (ex. Bessel function) を用いて null 点を変化させれば正確な結果が得られると期待される。本研究ではサイズの推定とともにその変化を考えることが重要である。そのためには今回観測で求めた天体サイズが、異なる時期に観測したデータと比較して変化するかを検討する必要がある。

次のセクションからは同様の解析を全観測天体について実施した結果について示す。ただし、06.539 – 0.108, 14.230 – 0.509, 14.33 – 0.63, 53.62 + 0.04 については baseline-fit によって 3σ 以上のメーザ放射を検出することができなかったため visibility-plot の作成はなしとする。また天体の放射領域サイズを導出するのに必要な天体までの距離が不明である 0.167 – 0.446, 174.19 – 0.09, 213.70 – 12.6, 4.434 + 0.129, 06.610 – 0.082, 06.795 – 0.257, G351.2 + 0, G353.2 + 0 についてもサイズ推定の考察から除外する。したがって、残りの 43 天体についての結果を示す。各天体の fitting 前の visibility-plot については appendix の E にまとめた。

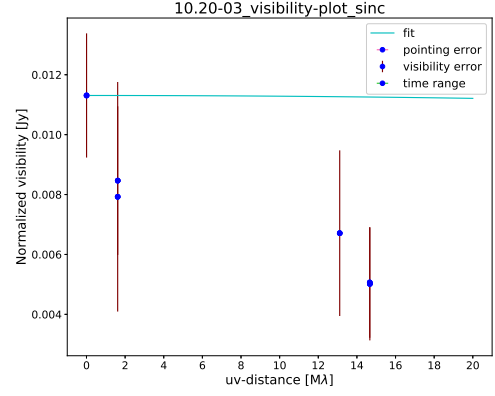
5.2.2 10.205 – 0.345

Visibility-plot を gaussian と sinc function でフィッティングした結果を示す。

*⁸ ここで書いている FWHM はフーリエ変換前の値である



[1] 10.205-0.345のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2] 10.205-0.345のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 3.03 [M λ], first null= 277.83 [M λ]であった。天体までの距離については様々な方法で計測が行われている(Wienen et al. 2015)。

- H₂COの吸収線では、near distance = 6 [kpc] (Downes et al. 1980)
- spectrophotometricでは、distance = 3.4 [kpc] (Blum et al. 2001)
- HII領域の速度成分の吸収線では、far distance = 18.7 [kpc] (Georgelin & Georgelin 1976)
- H₂CO, OH, HIの吸収線では、kinematic distance = 14.5 [kpc] (Corbel et al. 1997)
- HIの吸収線では、 2 ± 0.93 [kpc] (Corbel et al. 1997)
- trigonometric parallaxでは、distance = 5[kpc] (Sanna et al. 2014)

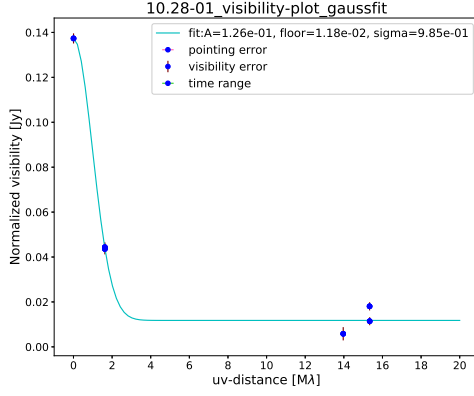
今回の解析ではtrigonometric parallaxである5 [kpc]を天体までの距離として採用する。この場合の放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 340 [\text{au}] \text{ (gaussian -fit)}$$

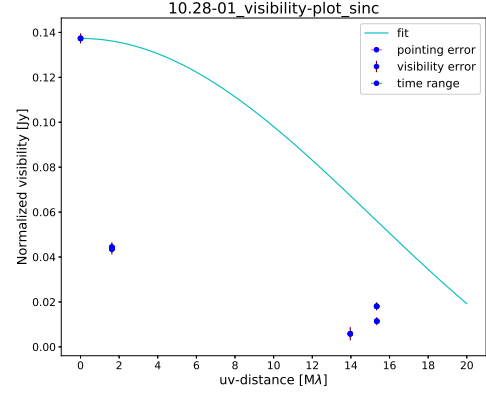
であると考えられる。全プロットのエラーバーは大きいですが、導出したサイズはhaloと一致する。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 14.59 [M λ]とすると、70 [au]と見積もられる。sinc functionではfittingが不適切であることからサイズの信頼性はない。

5.2.3 10.287 – 0.125

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]10.287-0.125のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]10.287-0.125のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

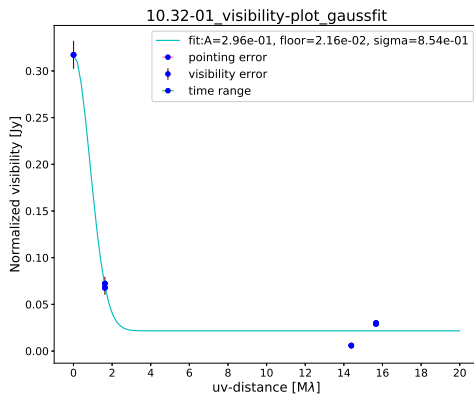
フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 2.31 [Mλ], first null = 22.87 [Mλ]である。天体までの距離はspectrophotometric distancedで3.55 [kpc] (Forster & Caswell 2000, He et al. 2015, Urquhart et al. 2013, Moisés et al. 2011, Furness et al. 2010, Blum et al. 2001)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 316 [\text{au}] \text{ (gaussian -fit)}$$

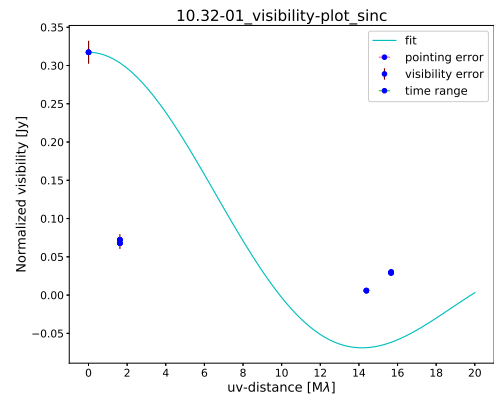
であると考えられる。プロットのエラーバーは小さく、 gaussでよくfitできている。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 15.25 [Mλ]とすると、48 [au]と見積もられる。 gaussの結果から、 haloは数百au程度であり、 coreは数十au程度のスポットであると考えられる。 sinc functionでのfittingはcoreサイズのfittingに近い形状となっている。

5.2.4 10.323 – 0.160

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]10.323-0.160のvisibility-plot
(gaussian -fit)



[2]10.323-0.160のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

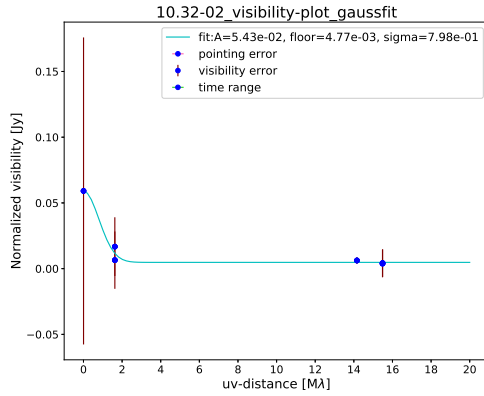
フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 2.01 [Mλ], first null= 9.90 [Mλ]である。天体までの距離はHIの吸収線により、 2 ± 0.93 [kpc] (Wienen et al. 2015)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 205 \pm 95 [\text{au}] \text{ (gaussian -fit)}$$

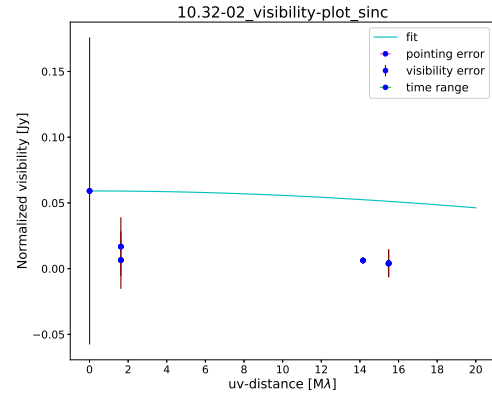
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 15.59 \text{ [M}\lambda\text{]}$ とすると、 $26 \pm 12 \text{ [au]}$ と見積もられる。gaussianではよくfittingできているが、sincではプロット全体をfittingするような形状になっていることから、haloサイズはgaussianで推定。

5.2.5 10.320 – 0.259

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]10.320-0.259のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]10.320-0.259のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

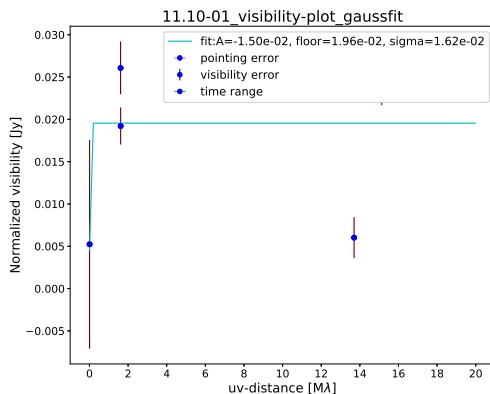
フィッティングの結果、 gaussian fittingの $\text{FWHM} = 1.87 \text{ [M}\lambda\text{]}$, first null= $53.14 \text{ [M}\lambda\text{]}$ である。天体までの距離はHIの吸収線により、 $2 \pm 0.93 \text{ [kpc]}$ (Wienen et al. 2015)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 219 \pm 102 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

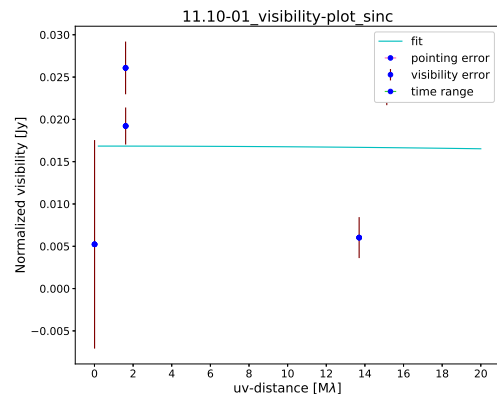
また $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 15.41 \text{ [M}\lambda\text{]}$ とすると、 $26 \pm 12 \text{ [au]}$ と見積もられる。であると考えられる。HTにおけるエラーバーが非常に大きいため、正確なサイズ推定は難しい。しかし、fittingはgaussianであっていることからhaloは200 [au]程度であると考えられる。

5.2.6 11.109 – 0.114

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]11.109-0.114のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

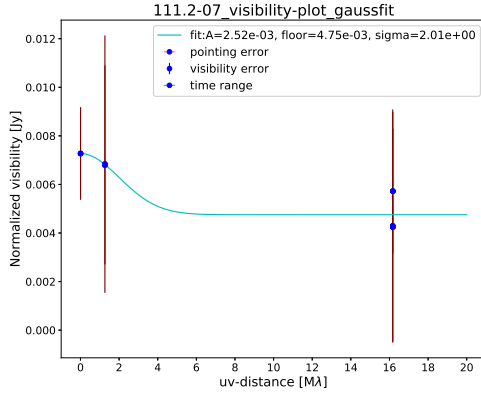


[2]11.109-0.114のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

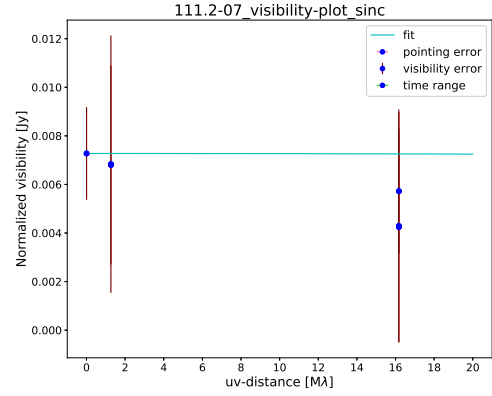
uv-distanceごとのvisibility値が散逸しているため正確な形状をよみとることはできない。よって放射領域サイズは推定できなかった。 $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 15.06 \text{ [M}\lambda\text{]}$ とすると、 49 [au] と見積もられる。

5.2.7 111.24 – 0.76

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1] 111.24-0.76のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

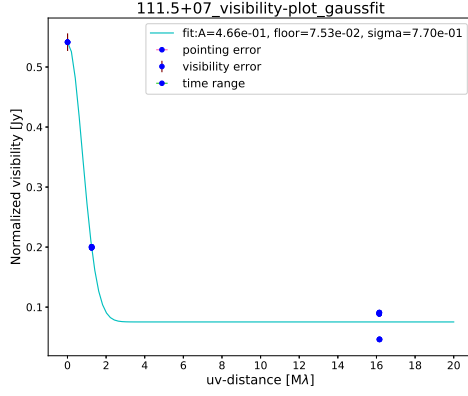


[2] 111.24-0.76のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

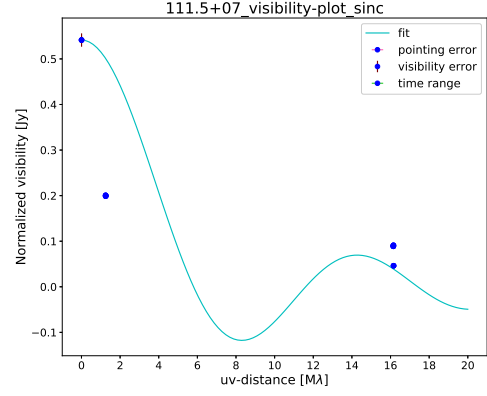
フィッティングの結果、gaussian fittingの $\text{FWHM} = 4.72 \text{ [M}\lambda\text{]}$, first null = $431.91 \text{ [M}\lambda\text{]}$ である。天体までの距離はparallaxes and kinematic distancesで $d = 3.34 \pm 0.27 \text{ [kpc]}$ (Choi et al. 2014, Vallee 2018)であり、放射領域サイズは $R(\text{halo}) = 145 \pm 11 \text{ [au]}$ (gaussian -fit)であると考えられる。全プロットでエラーバーが大きいためサイズ推定の正確性は悪いと考えられる。gaussianのfitを信頼するとhaloは約 100 [au] 程度であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 16.36 \text{ [M}\lambda\text{]}$ とすると、 $42 \pm 3 \text{ [au]}$ と見積もられる。sinc functionではfittingが不適切であることからサイズの信頼性はない。

5.2.8 111.53 + 0.76

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1] 111.53+0.76のvisibility-plot
(aussian -fit)

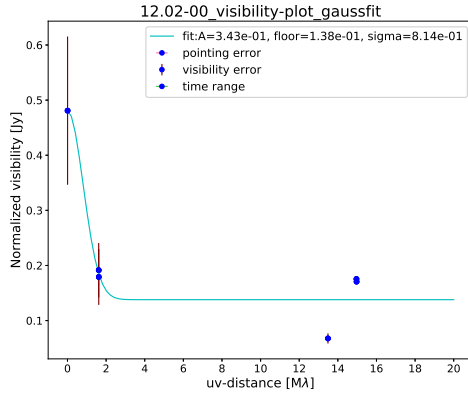


[2] 111.53+0.76のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

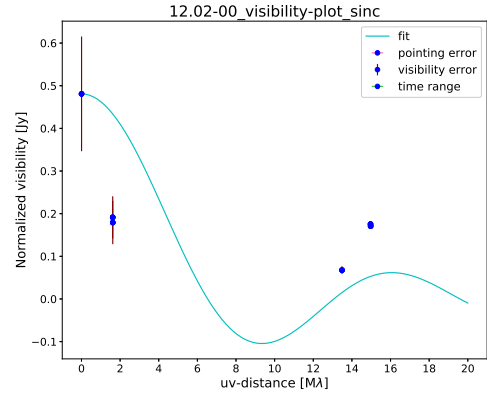
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 1.81[Mλ], first null= 5.80[Mλ]である。
天体までの距離optical distanceでは2.8 [kpc] (Fish et al. 2003, Campbell & Thompson 1984, Blitz et al. 1982)であり、放射領域サイズは
 $R(\text{halo}) = 318 \text{ [au]}$ (gaussian -fit)
であると考えられる。エラーバーは小さく、二つのfittingであっていることがわかる。gaussianから haloのサイズは300au程度であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 16.32 [Mλ]とすると、35 [au]と見積もられる。

5.2.9 12.025 – 0.031

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1] 12.025-0.031のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



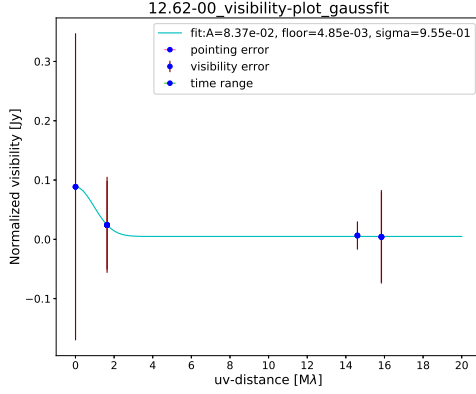
[2] 12.025-0.031のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 1.91[Mλ], first null= 6.53[Mλ]である。
天体までの距離はtrigonometric parallax では $d = 9.43 \pm 0.7 \text{ [kpc]}$ (Sanna et al. 2014)であり、放射領域サイズは
 $R(\text{halo}) = 1195 \pm 75 \text{ [au]}$ (gaussian -fit)
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM =14.90 [Mλ]とすると、 $153 \pm 9 \text{ [au]}$ と見積もられる。HTの誤差は大きいプロットの形状としては大きく変化しないため、サイズの推定は可

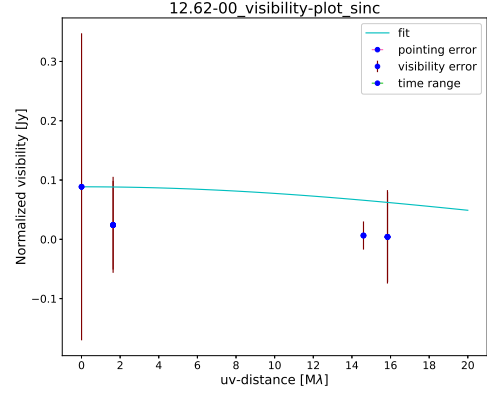
能である。haloのサイズが非常に大きいことから、全体のスポットサイズは非常に大きいと考えられる。

5.2.10 12.625 – 0.017

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]12.625-0.017のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]12.625-0.017のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 2.24 [Mλ], first null = 35.46 [Mλ]である。

天体までの距離は (Wienen et al. 2015)より

- HIの吸収線では、 near distance= 4.2 ± 0.39 [kpc]
- parallax distanceでは、 2.4 ± 0.17 [kpc] (Immer et al. 2013)
- near kinematic distance = 4.9 ± 0.3 [kpc]

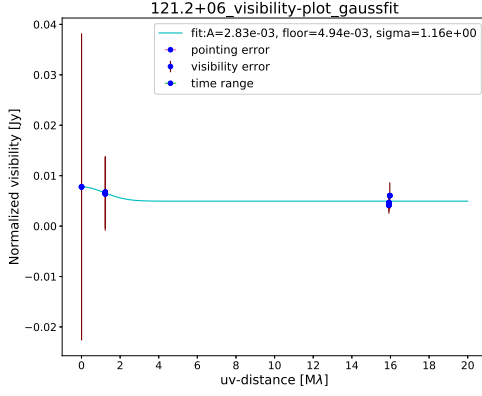
天体までの距離はparallax distance = 2.4 ± 0.17 [kpc]として計算したところ、放射領域サイズは

R (halo) = 220 ± 15 [au] (gaussian -fit)

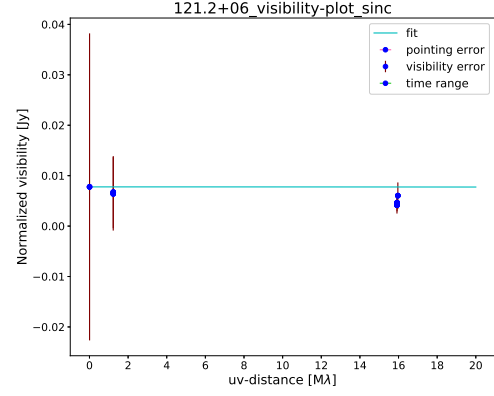
であると考えられる。また R (core)の上限値はFWHM = 15.78 [Mλ]とすると、 31 ± 2 [au]と見積もられる。全プロットで縦軸の誤差が大きいがgaussianの結果からhaloは200au程度であると考えられる。

5.2.11 121.28 + 0.65

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1] 121.28+0.65のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2] 121.28+0.65のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM = 2.74 [Mλ], first null = 404.02 [Mλ]である。

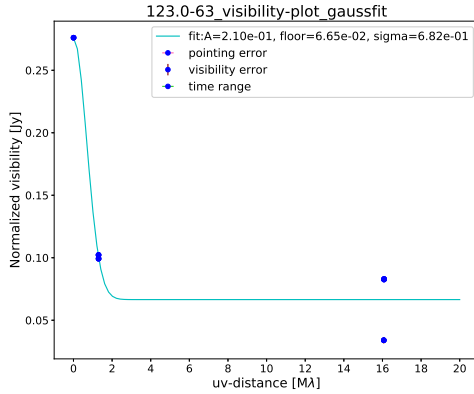
天体までの距離はmonte carlo parallaxでは 0.93 ± 0.04 [kpc] (Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 69 \pm 03 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

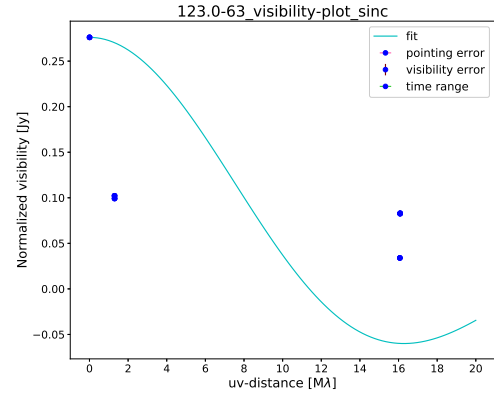
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 16.13 [Mλ]とすると、 11 ± 0.8 [au]と見積もられる。HTに関する誤差が大きいいため、それによってサイズも変化する可能性がある。

5.2.12 123.05 – 6.31

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1] 123.05-6.31のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2] 123.05-6.31のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 FWHM= 1.60[Mλ], first null= 11.379[Mλ]である。

天体までの距離はmonte carlo parallaxでは 2.77 ± 0.2 [kpc] (Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは

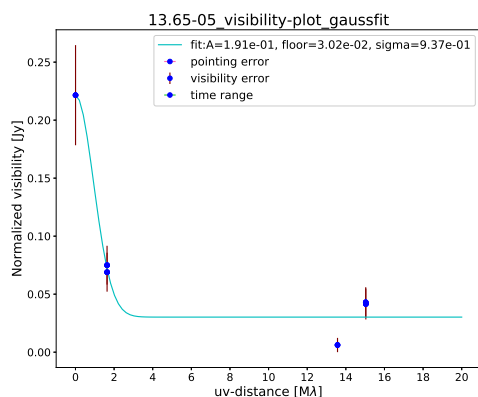
$$R(\text{halo}) = 355 \pm 25 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM =16.33 [Mλ]とすると、 34 ± 2 [au]と見積もられる。誤差も少なく、フィッティングの形状もあっていることからhaloのサイズは350 [au]程度で

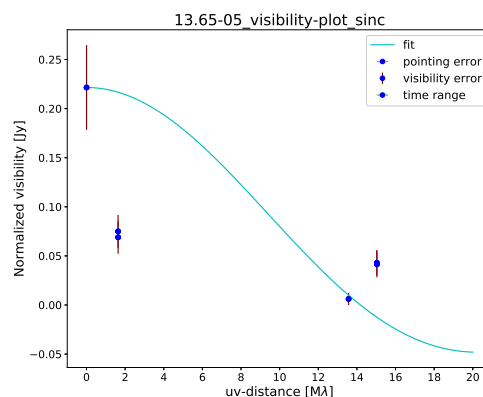
あると考えられる。

5.2.13 13.657 – 0.599

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]13.657-0.599のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]13.657-0.599のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 2.20 [Mλ], first null= 14.18[Mλ]である。

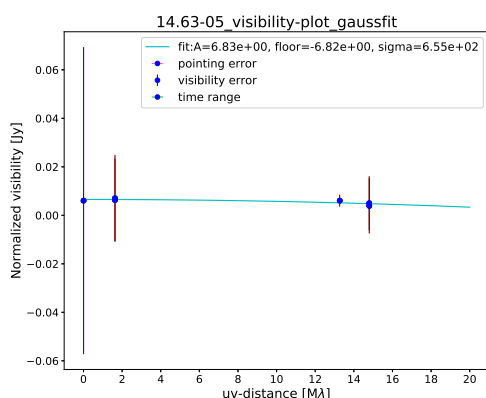
天体までの距離は4.1 [kpc] (Maud et al. 2015)であり、放射領域サイズは

$R(\text{halo}) = 383 \text{ [au]}$ (gaussian -fit)

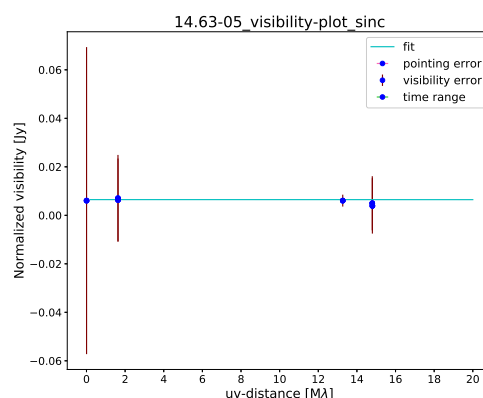
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 14.98 [Mλ]とすると、56[au]と見積もられる。両fittingでよくあっていることがわかる。gaussianからhaloは400au程度の大きさを持つと考えられる。またgaussianのfloreからcoreのサイズを算出したところ、約56[au]となった。

5.2.14 14.631 – 0.577

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]14.631-0.577のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



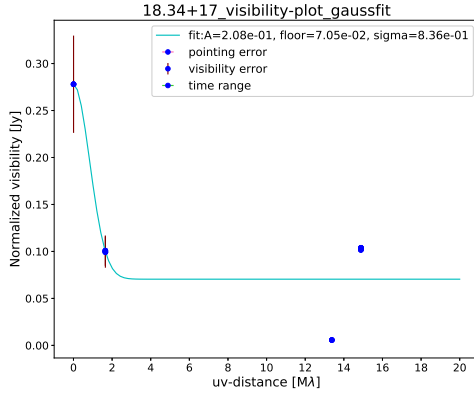
[2]14.631-0.577のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM = 1593 [Mλ], first null= 485.15 [Mλ]である。

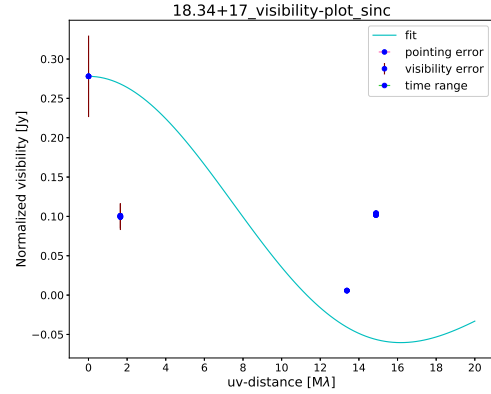
天体までの距離は heliocentric distance では 2.1 [kpc] (He et al. 2015) であり、放射領域サイズは $R(\text{halo}) = 0.23 \text{ [au]}$ (gaussian -fit) であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 14.76 \text{ [M}\lambda\text{]}$ とすると、25 [au] と見積もられる。誤差が大きく、プロットもフラットであることからサイズの正確性に関しては議論しない。

5.2.15 18.341 + 1.768

Visibility-plot を gaussian と sinc function でフィッティングした結果を示す。



[1] 18.341+1.768 の visibility-plot
(Gaussian -fit)



[2] 18.341+1.768 の visibility-plot
(Sinc function - fit)

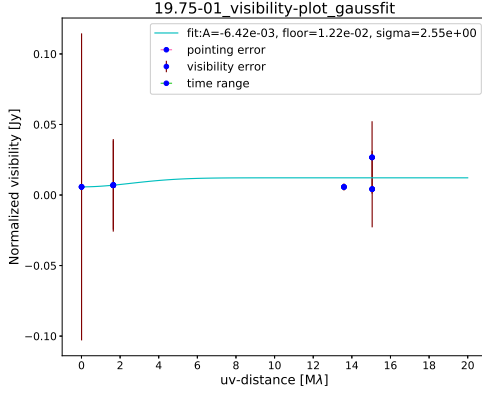
フィッティングの結果、 gaussian fitting の $\text{FWHM} = 1.96 \text{ [M}\lambda\text{]}$, first null = 11.30 [Mλ] である。天体までの距離は kinematic distances では $d = 2.0 \text{ [kpc]}$ (Cooper et al 2012) であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 209 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

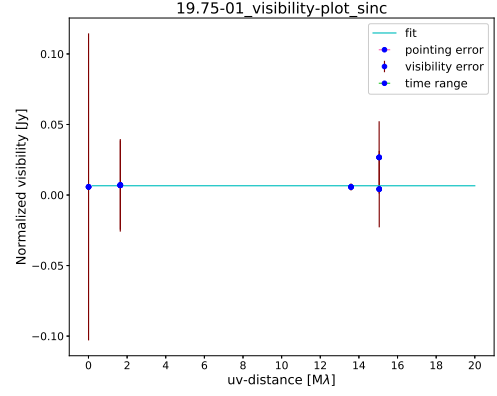
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 14.89 \text{ [M}\lambda\text{]}$ とすると、27 [au] と見積もられる。両 fitting でよく近似できていることがわかる。halo は約 200 [au] 程度であると考えられる。gaussian から導出した core のサイズは約 30 au 程度であった。

5.2.16 19.755 − 0.128

Visibility-plot を gaussian と sinc function でフィッティングした結果を示す。



[1]19.755-0.128のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]19.755-0.128のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

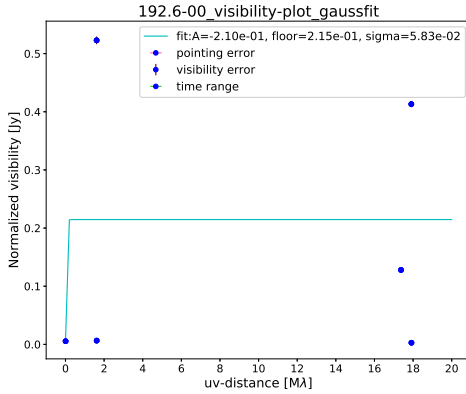
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM=6.01 [Mλ], first null= 477.75 [Mλ]である。天体までの距離はkinematic distancesでは $d = 8.0$ [kpc] (Cooper et al 2012)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 274 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

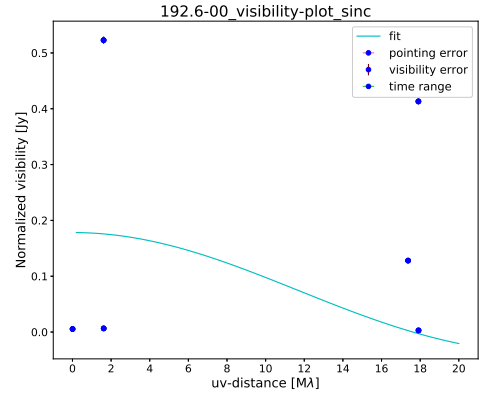
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 15.06 [Mλ]とすると、109 [au]と見積もられる。誤差が大きいため、プロットもフラットであることからサイズの正確性に関しては議論しない。

5.2.17 192.60 – 0.05

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]192.60-0.05のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]192.60-0.05のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 0.13 [Mλ], first null = 17.62[Mλ]である。天体までの距離はparallaxes and kinematic distancesでは $d = 1.52 \pm 0.09$ [kpc] (Vallee 2018, Choi et al. 2014)であり、放射領域サイズは

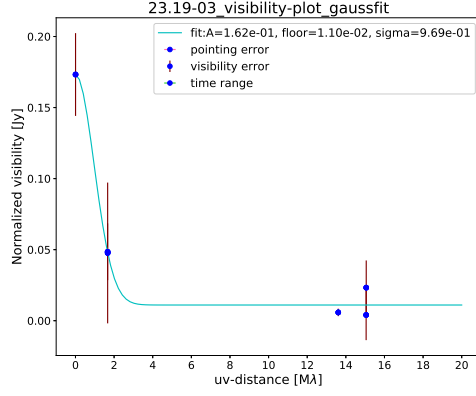
$$R(\text{halo}) = 17 \pm 1 \text{ [au]} \text{ (Sinc function - fit)}, \quad R(\text{halo}) = 2285 \pm 135. \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 18.05 [Mλ]とすると、 17 ± 1 [au]と見積もられる。プロットが散逸しているため、fittingができていないことがわかる。導出したサイズも

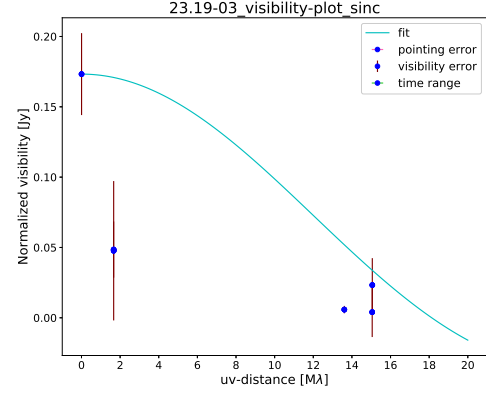
小さい値になっており、正確性でない。

5.2.18 23.19 − 0.38

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]23.19-0.38のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

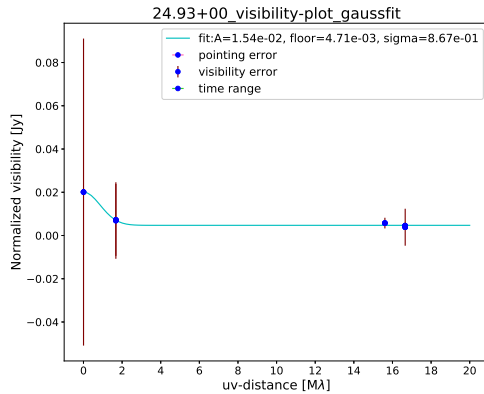


[2]23.19-0.38のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

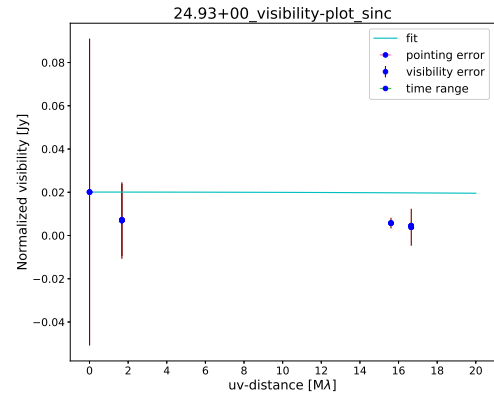
フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 2.28[Mλ], first null = 18.13[Mλ]である。
天体までの距離はadopted distance and the resulting Galactocentric distanceでは
near distance : 5.0 [kpc] (Giannetti et al. 2014)
far distance : 10.6 [kpc] (Giannetti et al. 2014)
であり、本解析ではnear distanceを使用する。このときの放射領域サイズは
 $R(\text{halo}) = 452 \text{ [au]}$ (gaussian -fit)
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 15.10 [Mλ]とすると、68 [au]と見積もられる。
誤差は少し大きいだが、両fittingであっている。haloは450 [au]程度であることから比較的大きい
スポットであると考えられる。

5.2.19 24.93 + 0.08

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]24.93+0.08のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

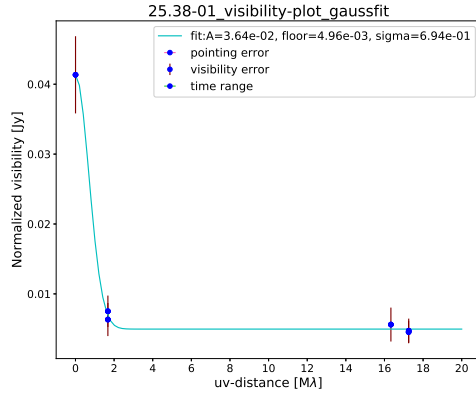


[2]24.93+0.08のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

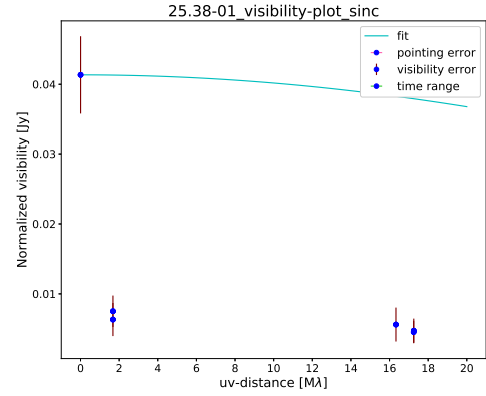
フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 2.04[M λ], first null= 156.43[M λ]である。
天体までの距離はnear kinematic distanceでは $d = 2.99 \pm 0.3$ [kpc] (Cyganowski et al. 2009, Cyganowski et al. 2011, Reid et al. 2009)であり、放射領域サイズは
 $R(\text{halo}) = 302 \pm 30$ [au] (gaussian -fit)
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 16.68 [M λ]とすると、 36 ± 3 [au]と見積もられる。誤差が大きいため、正確性はあまりないと考えられる。gaussianの結果を信頼すると、haloは300 [au]程度である。またgaussianから導出したcoreのサイズは約30 [au]程度であることから、coreとhaloのサイズはオーダーが一桁異なると考えられる。

5.2.20 25.38 – 0.18

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]25.38-0.18のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

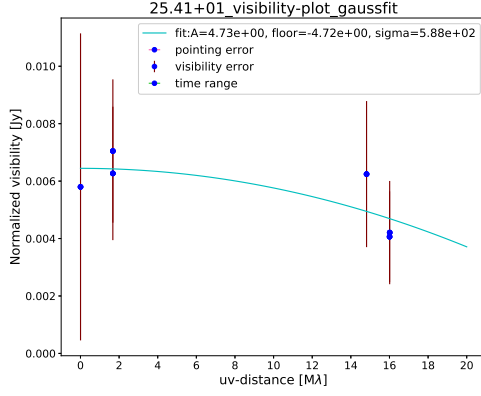


[2]25.38-0.18のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

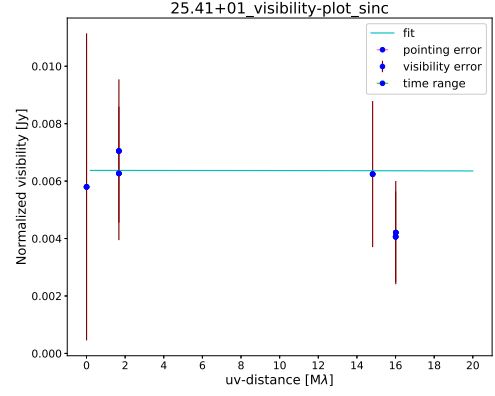
フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 1.63[M λ], first null= 75.98[M λ]である。
天体までの距離はspectrophotometric distanceでは $d = 2.7 \pm 1.1$ [kpc] (Green , McClure-Griffiths 2011)であり、放射領域サイズは
 $R(\text{halo}) = 340 \pm 138$ [au] (gaussian -fit)
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 17.27 [M λ]とすると、 32 ± 13 [au]と見積もられる。gaussianの結果から、haloは350 [au]程度、coreは30 [au]程度であることから、この天体もひとまわり大きいhaloがcoreを取り巻くという描像になる。sinc functionではfittingがずれていることからサイズの信頼性はなし。

5.2.21 25.41 + 0.10

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1] 25.41+0.10のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2] 25.41+0.10のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM=1301.56 [Mλ], first null= 493.068 [Mλ]である。

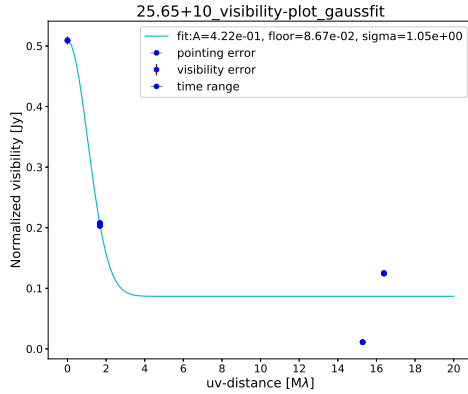
天体までの距離は9.5 [kpc] (Bartkiewicz et al. 2009, Sridharan et al. 2002)であり、放射領域サイズは

$R = 3$ [au] (Sinc function - fit), R (halo) = 1 [au](gaussian -fit)

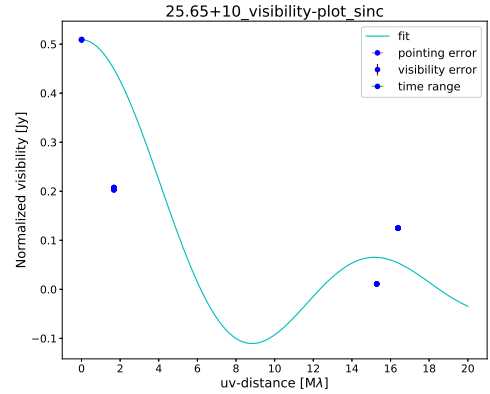
であると考えられる。また R (core)の上限値はFWHM = 16.05 [Mλ]とすると、122 [au]と見積もられる。誤差が大きいためfittingが正確にできていない。サイズに関しても正確でない。

5.2.22 25.65 + 1.04

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1] 25.65+1.04のvisibility-plot
(gaussian -fit)



[2] 25.65+1.04のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 2.48 [Mλ], first null= 6.17[Mλ]である。

天体までの距離はkinematic distancesでは $d = 3.1$ [kpc] (Cooper et al 2012)であり、放射領域サイズは

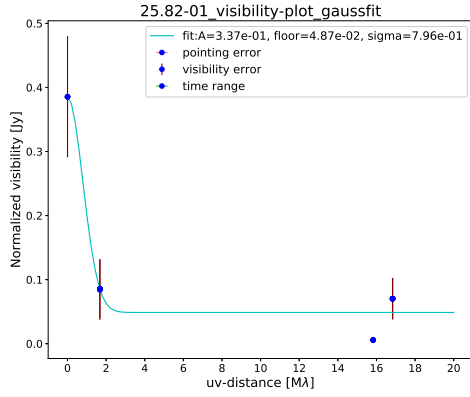
R (halo) = 257 [au] (gaussian -fit)

であると考えられる。また R (core)の上限値はFWHM =16.43 [Mλ]とすると、38 [au]と見積もられる。誤差が少なく、fittingも一致していること。gaussian-fitからhaloは250 [au]であると考えられ

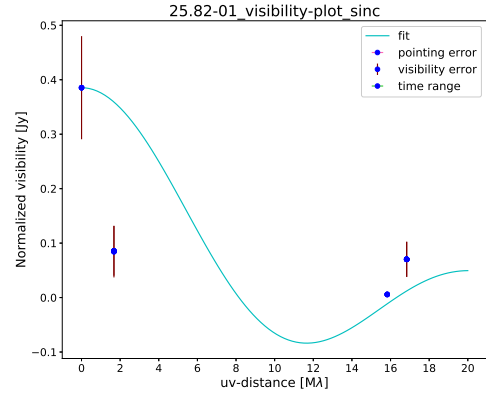
る。gaussianから求めたcoreは約40 [au]程度であった。

5.2.23 25.82 – 0.17

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]25.82-0.17のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

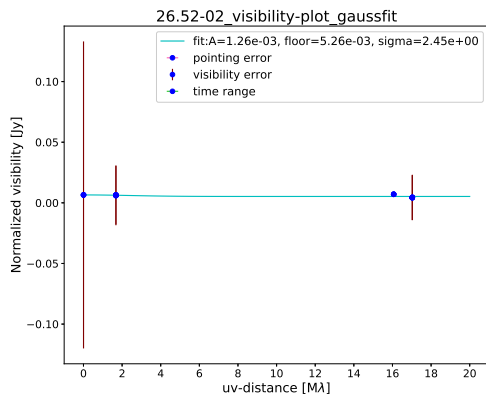


[2]25.82-0.17のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

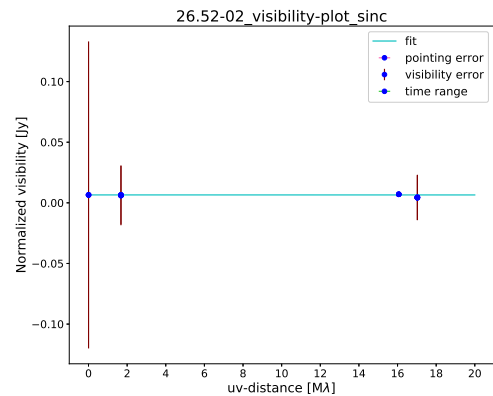
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 1.87[Mλ], first null= 8.15[Mλ]である。天体までの距離はspectrophotometric distaneでは $d = 5.0 \pm 0.3$ [kpc] (Green , McClure-Griffiths 2011)であり、放射領域サイズは $R(\text{halo}) = 550 \pm 33$ [au](gaussian -fit) であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 16.86 [Mλ]とすると、 61 ± 3 [au]と見積もられる。HTにおける誤差は大きいが、形状はgaussianでよくfittingできている。このことから、gaussianでcore,haloのサイズを導出すると、約60 [au]と500 [au]と求めることができ広がったスポットであると考えられる。

5.2.24 26.52 – 0.26

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]26.52-0.26のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]26.52-0.26のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

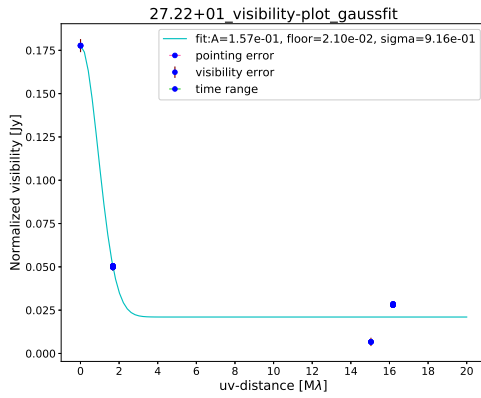
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 5.76 [M λ], first null= 481.37 [M λ]である。
天体までの距離はspectrophotometric distanceでは $d = 9.5 \pm 0.3$ [kpc] (Green , McClure-Griffiths 2011)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 339 \pm 10 [\text{au}] \text{ (gaussian -fit)}$$

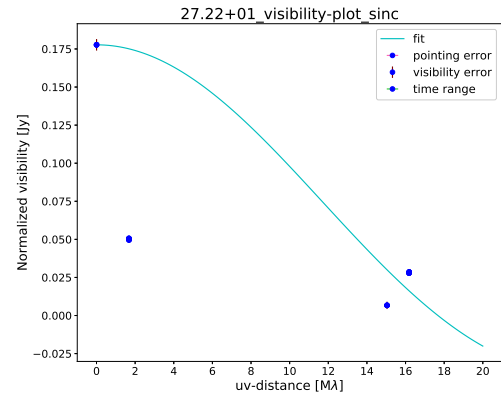
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 17.05 [M λ]とすると、 114 ± 3 [au]と見積もられる。誤差が大きく、プロットもfittingもフラットになっていることから正確性は議論できない。

5.2.25 27.22 + 0.13

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]27.22+0.13のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]27.22+0.13のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

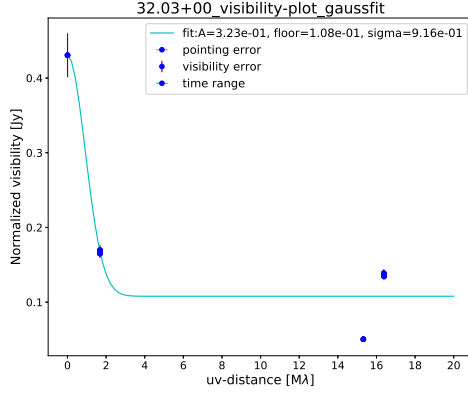
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 2.15 [M λ], first null= 17.67 [M λ]である。
天体までの距離はkinematic distancesでは $d = 7.6$ [kpc] (Cooper et al 2012)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 727 [\text{au}] \text{ (gaussian -fit)}$$

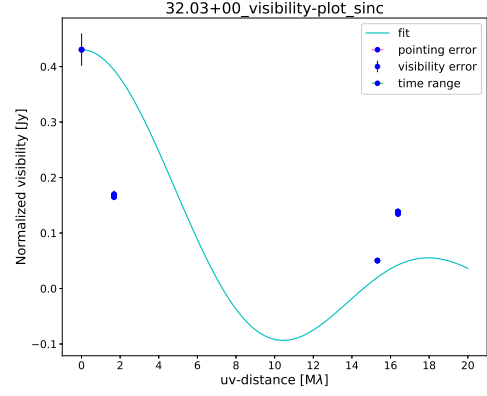
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 16.24 [M λ]とすると、96 [au]と見積もられる。gaussian, sinc functionともにfittingできていること。haloのサイズは700 [au]であることからスポットサイズは大きいと考えられる。

5.2.26 32.03 + 0.06

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1] 32.03+0.06のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

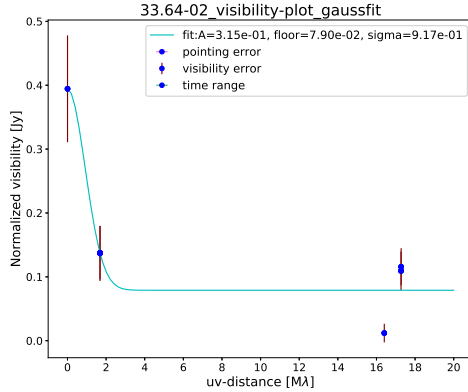


[2] 32.03+0.06のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

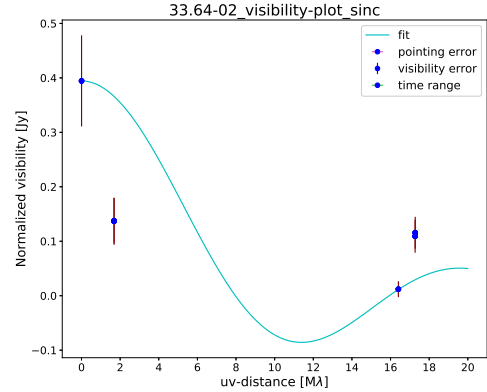
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 2.15 [M λ], first null= 7.29 [M λ]である。天体までの距離はmonte carlo parallax and derived kinematic distancesでは $d = 5.16 \pm 0.2$ [kpc] (Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは $R(\text{halo}) = 493 \pm 19$ [au] (gaussian -fit) であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 16.47 [M λ]とすると、 64 ± 2 [au]と見積もられる。gaussianでよくfittingできることから、haloのサイズには正確性があると判断した。

5.2.27 33.64 – 0.21

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1] 33.64-0.21のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



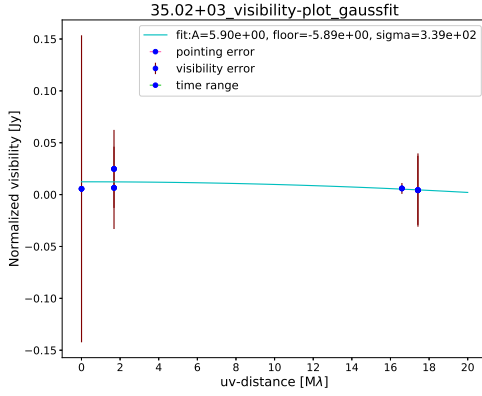
[2] 33.64-0.21のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM=2.15 [M λ], first null= 7.96 [M λ]である。天体までの距離はmonte carlo parallax and derived kinematic distancesでは $d = 5.166.40 \pm 0.7$ [kpc] (Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは $R(\text{halo}) = 611 \pm 66$ [au] (gaussian -fit) であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 17.34 [M λ]とすると、 76 ± 8 [au]と見積もられる。HTにおける誤差は大きいだが、fittingはgaussianでよくできている。gaussianから導出したサイズはcoreが約75 [au], haloで600 [au]という結果になった。この天体は過去の研究でも数日間

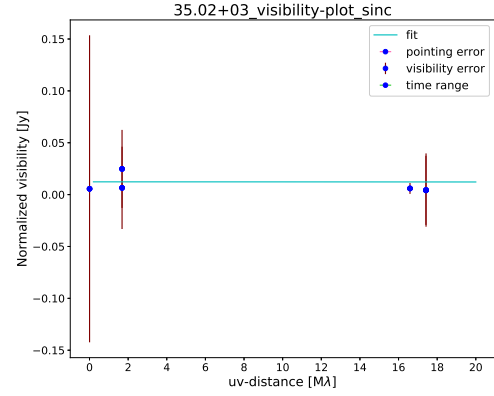
で数倍の強度に及ぶバーストが確認されている(Fujisawa et al. 2012, Fujisawa et al. 2014)ことから、coreとhaloでサイズが一回り違うことから強度変動を説明することができると考えられる。

5.2.28 35.02 + 0.35

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]35.02+0.35のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]35.02+0.35のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 865.54 [Mλ], first null = 255.42 [Mλ]である。

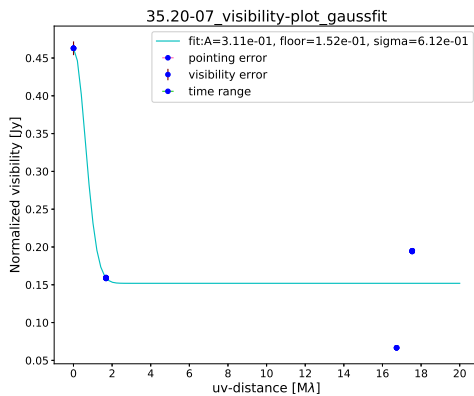
天体までの距離はmonte carlo parallax and derived kinematic distancesでは $d = 2.30 \pm 0.2$ [kpc] (Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは

R (halo) = 0.54 [au](gaussian -fit)

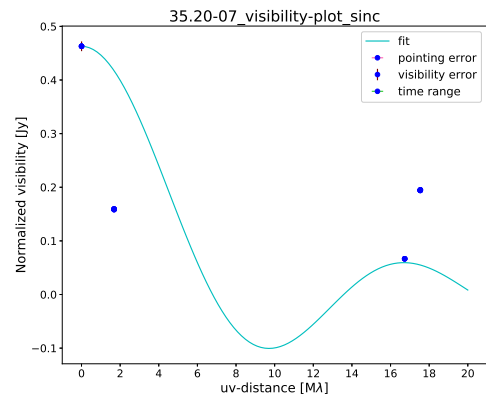
であると考えられる。また R (core)の上限値はFWHM = 17.50 [Mλ]とすると、 27 ± 2 [au]と見積もられる。誤差が大きいため、fittingがフラットなことからサイズの正確性は議論できない。

5.2.29 35.20 - 0.74

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]35.20-0.74のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

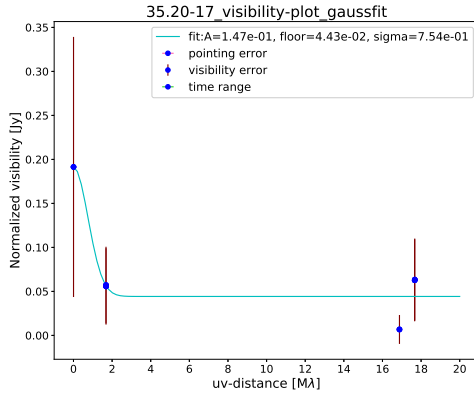


[2]35.20-0.74のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

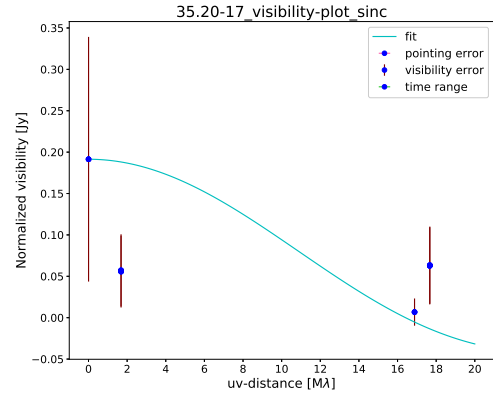
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 1.44 [M λ], first null= 6.78[M λ]である。
 天体までの距離はmonte carlo parallax and derived kinematic distancesでは $d = 2.17 \pm 0.2$ [kpc]
 (Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは
 $R(\text{halo}) = 310 \pm 28$ [au](gaussian - fit)
 であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 17.61 [M λ]とすると、 25 ± 2 [au]と見積
 もられる。gaussianでfittingできていることからhaloのサイズは300 [au]程度であると考えられる。

5.2.30 35.20 – 1.74

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]35.20-1.74のvisibility-plot
 (Gaussian -fit)

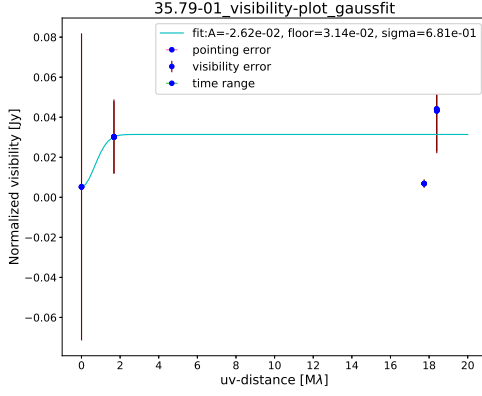


[2]35.20-1.74のvisibility-plot
 (Sinc function - fit)

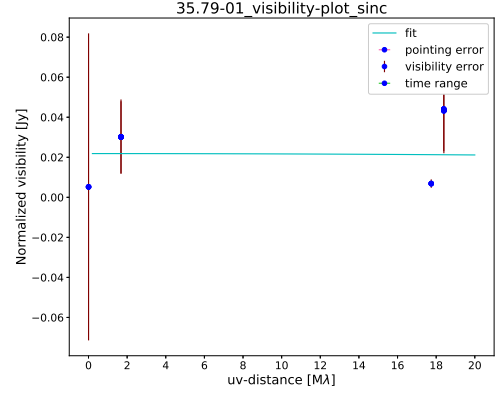
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM = 1.77[M λ], first null = 16.41 [M λ]である。
 天体までの距離はmonte carlo parallax and derived kinematic distancesでは $d = 3.14 \pm 0.5$ [kpc]
 (Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは
 $R(\text{halo}) = 364 \pm 58$ [au] (gaussian -fit)
 であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 17.73 [M λ]とすると、 39 ± 4 [au]と見積
 もられる。全プロットにおいて誤差が大きいため、fittingの正確性は不明である。しかし、gaussian
 から早出したhalo, coreのサイズはひとまわり異なるということがわかる。

5.2.31 35.79 – 0.17

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]35.79-0.17のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

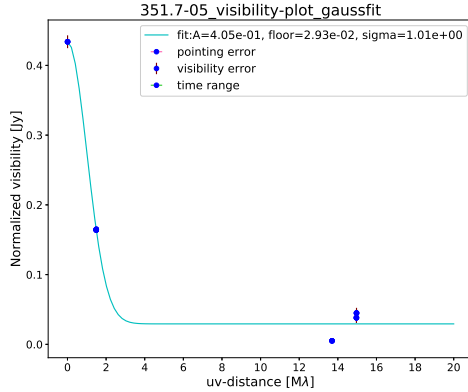


[2]35.79-0.17のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

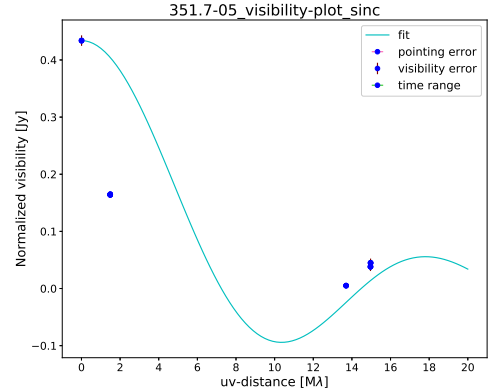
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM=1.60 [Mλ], first null= 143.83 [Mλ]である。天体までの距離はspectrophotometric distanceでは $d = 3.5 \pm 0.4$ [kpc] (Green , McClure-Griffiths 2011)であり、放射領域サイズは
 $R(\text{halo}) = 450 \pm 51$ [au] (gaussian -fit)
 であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 18.44 [Mλ]とすると、 39 ± 4 [au]と見積もられる。プロットが散逸しているためfittingはうまくできていない。

5.2.32 351.775 – 0.536

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]351.775-0.536のvisibility-plot
(Gaussian -fit)

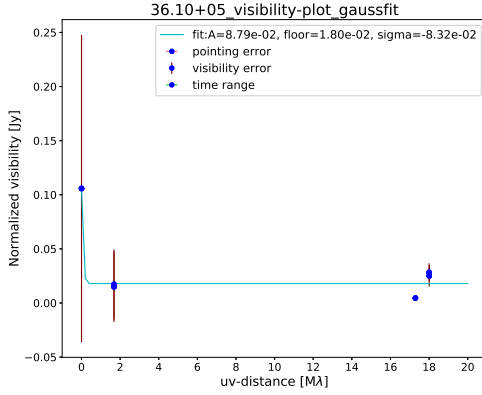


[2]351.775-0.536のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

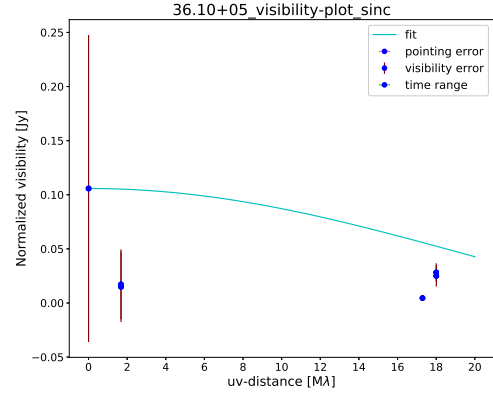
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM = 2.36 [Mλ], first null = 7.24 [Mλ]である。天体までの距離はkinematic distanceでは $d = 17.4$ [kpc] (Urquhart et al. 2013)であり、放射領域サイズは
 $R(\text{halo}) = 1516$ [au] (gaussian -fit)
 であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 14.75 [Mλ]とすると、243 [au]と見積もられる。gaussianの結果からhaloは1500 [au]と非常に広いスポットを持つ天体であると考えられる。

5.2.33 36.10+0.56

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]36.10+0.56のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]36.10+0.56のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

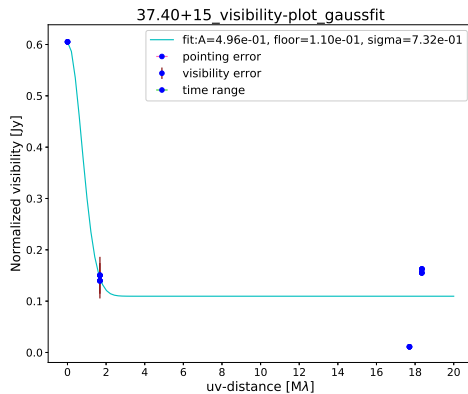
フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM = 0.19 [Mλ], first null = 29.69 [Mλ]である。天体までの距離はspectrophotometric distanceでは $d = 9.3 \pm 0.4$ [kpc] (Green , McClure-Griffiths 2011)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 9792 \pm 421 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

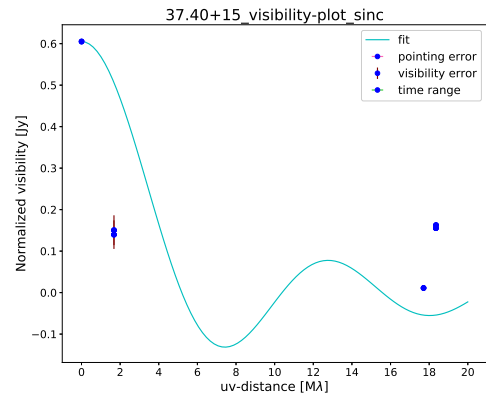
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 18.06 [Mλ]とすると、 106 ± 4 [au]と見積もられる。HTにおける誤差が大きいこと、fittingの形状が急であることからgaussianの結果は正確ではないと判断した。sinc functionに関してはfittingがうまくできていないことがわかる。

5.2.34 37.40 + 1.52

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]37.40+1.52のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]37.40+1.52のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 1.72 [Mλ], first null= 5.19 [Mλ]である。天体までの距離はmonte carlo parallax and derived kinematic distancesでは $d = 1.88 \pm 0.08$ [kpc]

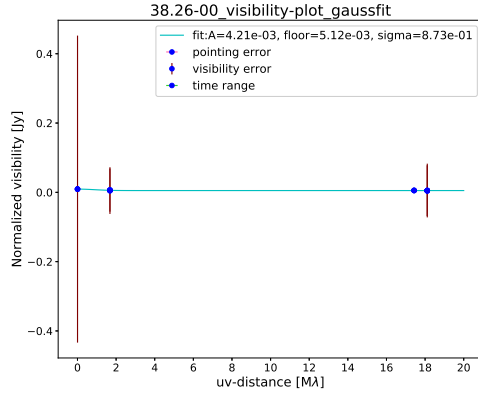
(Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 225 \pm 9 [\text{au}] \text{ (gaussian -fit)}$$

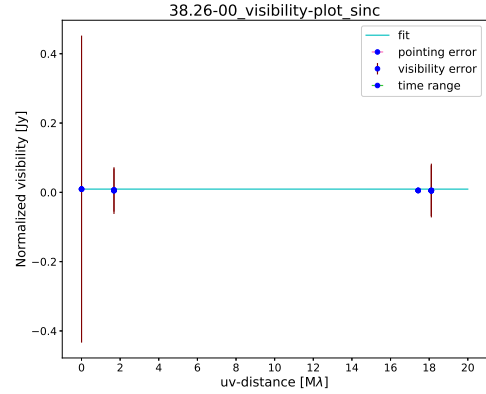
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 18.40 [\text{M}\lambda]$ とすると、 $21 \pm 0.8 [\text{au}]$ と見積もられる。gaussianでよくfittingできていることから、haloのサイズには正確性が高いと判断した。

5.2.35 38.26 – 0.08

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]38.26-0.08のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]38.26-0.08のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

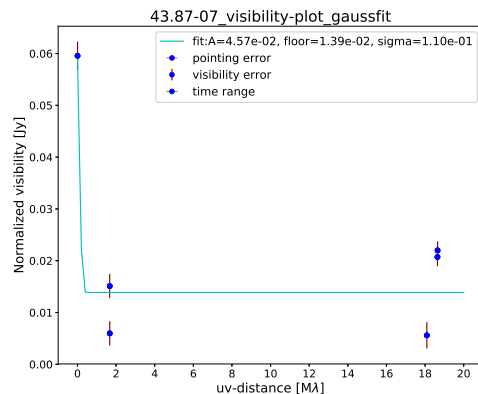
フィッティングの結果、gaussian fittingの $\text{FWHM} = 2.05 [\text{M}\lambda]$, first null = $336.61 [\text{M}\lambda]$ である。天体までの距離はspectrophotometric distanceでは $d = 0.8 \pm 0.4 [\text{kpc}]$ (Green , McClure-Griffiths 2011)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 80 \pm 40 [\text{au}] \text{ (gaussian -fit)}$$

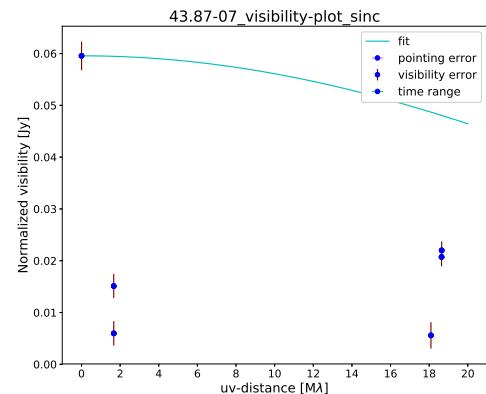
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 18.17 [\text{M}\lambda]$ とすると、 $9 \pm 4 [\text{au}]$ と見積もられる。HTにおける誤差が大きく、fittingがフラットであることからサイズ は正確ではない。

5.2.36 43.87-0.77

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]43.87-0.77のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]43.87-0.77のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

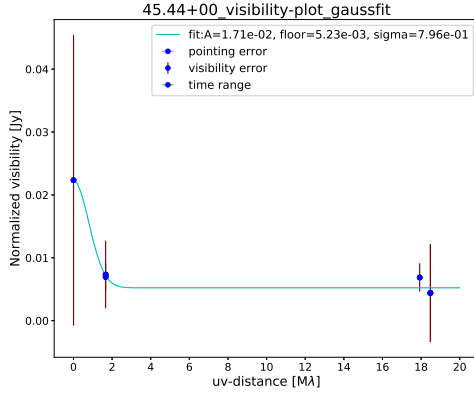
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM = 0.25 [M λ], first null = 52.74 [M λ]である。
天体までの距離はspectrophotometric distanceでは $d = 4.4 \pm 0.6$ [kpc] (Green , McClure-Griffiths
2011)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 3515 \pm 479 \text{ [au]} (\text{gaussian -fit})$$

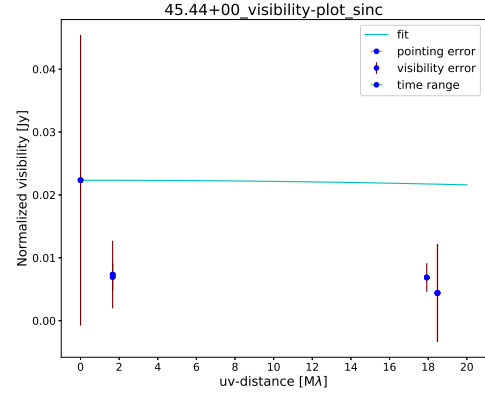
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 18.70 [M λ]とすると、 45 ± 6 [au]と見積
もられる。プロットに対してfittingがあっていないため、サイズは正確ではない。

5.2.37 45.44 + 0.07

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]45.44+0.07のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]45.44+0.07のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

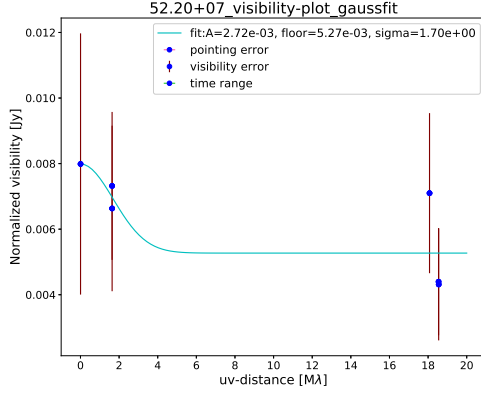
フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 1.87[M λ], first null= 140.64[M λ]である。
天体までの距離はmonte carlo parallax and derived kinematic distancesでは $d = 8.14 \pm 0.1$ [kpc]
(Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 896 \pm 11 \text{ [au]} (\text{gaussian -fit})$$

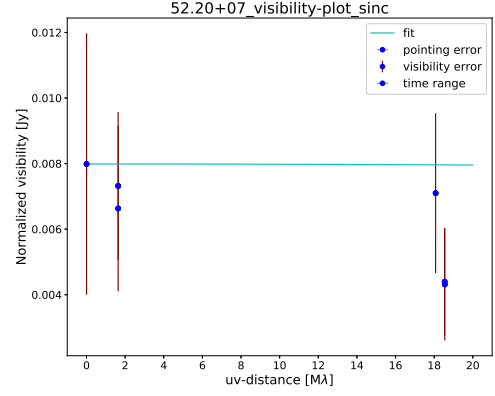
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 18.56 [M λ]とすると、 90 ± 1 [au]と見積
もられる。HTにおける誤差が大きい、gaussianでfittingできていることから、haloのサイズは約
千 [au]であると考えられる。

5.2.38 52.20 + 07

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]52.20+07のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]52.20+07のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

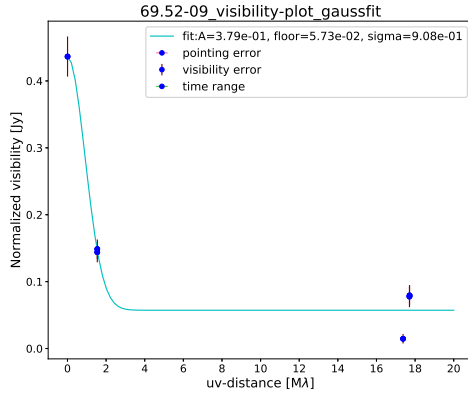
フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 3.99 [Mλ], first nul l= 393.24 [Mλ]である。天体までの距離はkinematic distanceでは $d = 10.2$ [kpc] (Cooper et al 2012)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 527 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

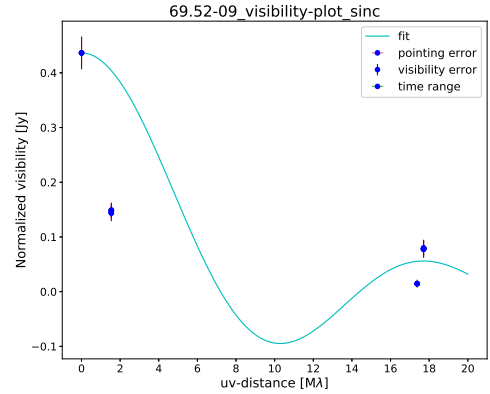
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 18.63 [Mλ]とすると、112 [au]と見積もられる。全プロットで誤差が大きい。gaussianの結果を信頼すると約500 [au]程度であると考えられる。

5.2.39 69.52 – 0.97

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]69.52-0.97のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]69.52-0.97のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

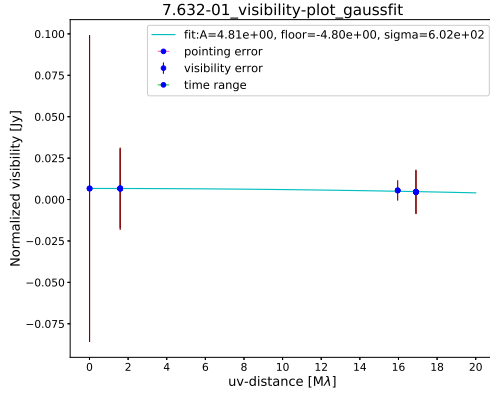
フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM = 2.13 [Mλ], first null = 7.19 [Mλ]である。天体までの距離はmonte carlo parallax and derived kinematic distancesでは $d = 2.46 \pm 0.08$ [kpc] (Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 237 \pm 7 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

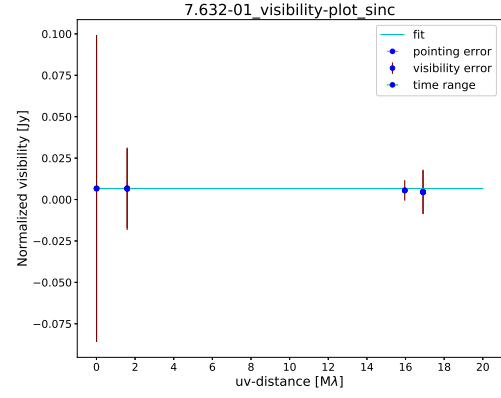
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 17.87 [Mλ]とすると、 28 ± 0.9 [au]と見積もられる。gaussianの結果からhaloは約200 [au]程度の大きさと考えられる。

5.2.40 07.632 − 0.109

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]07.632-0.109のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]07.632-0.109のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM= 1366.56 [Mλ], first null= 471.079 [Mλ]である。

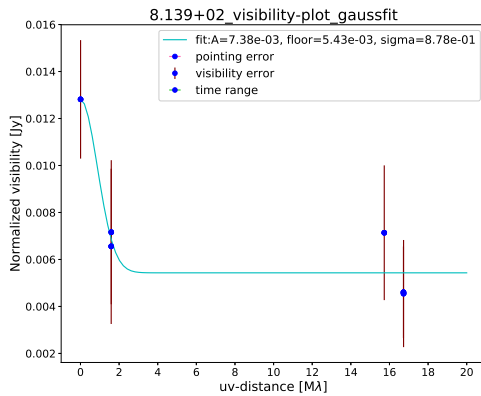
天体までの距離はspectrophotometric distaneでは $d = 3.2 \pm 0.6$ [kpc] (Green , McClure-Griffiths 2011)であり、放射領域サイズは

$R(\text{halo}) = 0.48$ [au] (gaussian -fit)

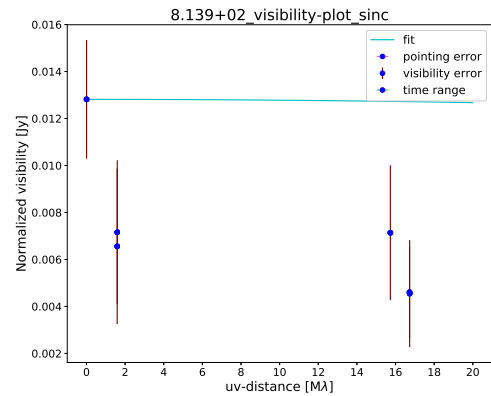
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値はFWHM = 16.81 [Mλ]とすると、 39 ± 7 [au]と見積もられる。誤差が大きく、fittingがフラットなためサイズの正確性は議論できない。

5.2.41 08.139 + 0.226

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]08.139+0.226のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]08.139+0.226のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、gaussian fittingのFWHM = 2.06 [Mλ], first null = 245.160 [Mλ]である。

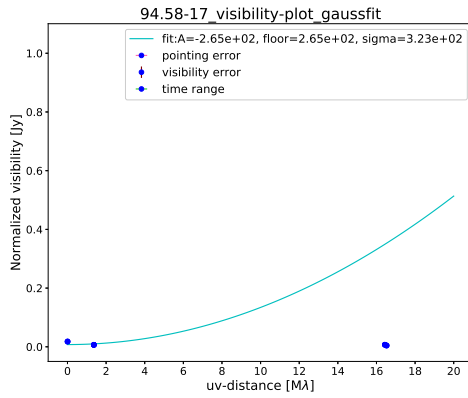
天体までの距離はspectrophotometric distanceでは $d = 11.7 \pm 0.4$ [kpc] (Green , McClure-Griffiths 2011)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 1167 \pm 39 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

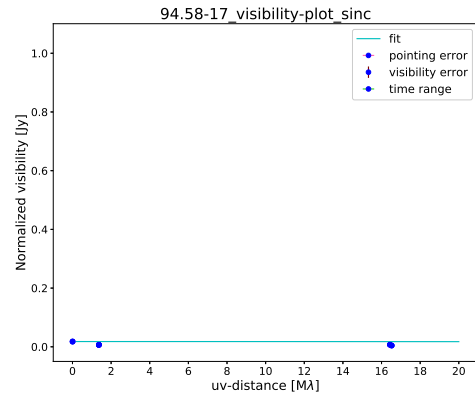
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 16.64$ [M λ]とすると、 145 ± 4 [au]と見積もられる。gaussianの結果を信頼すると、haloは1000 [au]以上となりサイズは大きい、天体までの距離が遠いことが影響していると考えられる。sinc functionではfittingが不適切であることからサイズの信頼性はない。

5.2.42 94.58 – 1.794

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]94.58-1.79のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]94.58-1.79のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingの $\text{FWHM} = 923.94$ [M λ], first null= 175.36 [M λ]である。

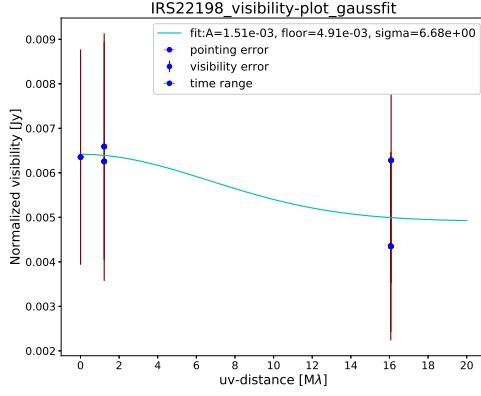
天体までの距離はmonte carlo parallax and derived kinematic distancesでは $d = 11.7 \pm 0.4$ [kpc] (Wenger et al.2018)であり、放射領域サイズは

$$R(\text{halo}) = 0.7 \text{ [au]} \text{ (gaussian -fit)}$$

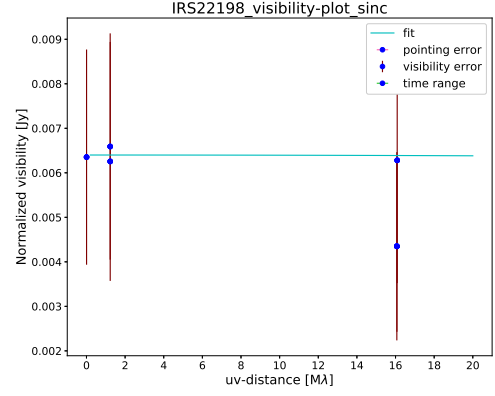
であると考えられる。また $R(\text{core})$ の上限値は $\text{FWHM} = 16.75$ [M λ]とすると、 42 ± 3 [au]と見積もられる。fittingがあっていないため、サイズ は正確性ではない。

5.2.43 IRS22198

Visibility-plotをgaussianとsinc functionでフィッティングした結果を示す。



[1]IRS22198のvisibility-plot
(Gaussian -fit)



[2]IRS22198のvisibility-plot
(Sinc function - fit)

フィッティングの結果、 gaussian fittingのFWHM= 17.24 [Mλ], first null= 490.8 [Mλ]である。天体までの距離はkinematic distanceでは $d = 0.76$ [kpc] (Fujisawa et al 2014, Hirota et al. 2008)であり、放射領域サイズは

R (halo) = 9 [au] (gaussian -fit)

であると考えられる。また R (core)の上限値はFWHM = 16.22 [Mλ]とすると、 9 ± 0.3 [au]と見積もられる。gaussianの結果を考慮すると、haloが10 [au]程度であることからコンパクトなスポットを持つと考えられる。sinc functionではfittingが不適切であることからサイズの信頼性はなし。

以上の結果から、各fittingで求められたパラメータを表にまとめる。^{*9}

^{*9} FWHMはフーリエ変換前の値である

object name	FWHM (halo) [M λ]	uv-distance (core) [M λ]	first null (core) [M λ]	A [Jy]	α [Jy]	visibility ratio (= A/α)
0.167−0.446	1.41e+03	4.24e+02	14.8e+00	7.46e-03	4.47e-03	1.66
10.205−0.345	3.03	14.59	2.77e+02	1.13e-02	5.06e-03	2.23
10.287−0.125	2.31	15.25	2.28e+01	11.37e-01	1.80e-02	7.60
10.323−0.160	2.01	15.59	9.90e+00	3.17e-01	2.91e-02	10.90
10.320−0.259	1.87	15.41	5.31e+01	5.91e-02	3.86e-03	15.27
11.109−0.114	3.81	15.06	1.86e+02	4.53e-03	2.35e-02	19.26
111.24−0.76	4.72	16.36	4.31e+02	7.27e-03	4.29e-03	1.69
111.53+0.76	1.81	16.32	5.80e+00	5.41e-01	8.88e-02	6.09
12.025−0.031	1.91	14.90	6.53e+00	4.80e-01	1.75e-01	2.74
12.625−0.017	2.24	15.78	3.54e+01	8.85e-02	4.22e-03	20.98
121.28+0.65	2.74	16.13	4.04e+02	7.77e-03	4.12e-03	1.88
123.05−6.31	1.60	16.33	1.13e+01	2.76e-01	8.26e-02	3.34
13.657−0.599	2.20	14.98	1.41e+01	2.21e-01	4.29e-02	5.15
14.631−0.577	1.54	14.76	4.85e+02	6.54e-03	4.97e-03	1.31
174.19−0.09	2.24	16.97	9.76e+00	3.21e-01	3.48e-03	92.38
18.341+1.768	1.96	14.89	1.13e+01	2.77e-01	1.01e-01	2.73
19.755−0.128	6.01	15.96	4.77e+02	5.77e-03	2.66e-02	0.21
192.60−0.05	0.13	18.05	1.76e+01	4.55e-03	4.13e-01	0.01
213.70−12.6	3.23	16.66	1.59e+01	1.96e-01	2.47e-02	7.95
23.19−0.38	2.28	15.10	1.81e+01	1.73e-01	4.02e-03	43.03
24.93+0.08	2.04	16.68	1.56e+02	2.00e-02	4.54e-03	4.41
25.38−0.18	1.63	17.27	7.59e+01	4.13e-02	4.54e-03	9.10
25.41+0.10	1.38	16.05	4.93e+02	6.44e-03	4.06e-03	1.58
25.65+1.04	2.48	16.43	6.17e+00	5.09e-01	1.24e-01	4.08
25.82−0.17	1.87	16.86	8.15e+00	3.85e-01	7.02e-02	5.48
26.52−0.26	5.76	17.05	4.81e+02	6.52e-03	4.27e-03	1.52

object name	FWHM (halo) [M λ]	uv-distance (core) [M λ]	first null (core) [M λ]	A [Jy]	α [Jy]	visibility ratio (= A/α)
27.22+0.13	2.15	16.24	1.76e+01	1.77e-01	2.78e-02	6.37
32.03+0.06	7.98	16.47	7.29e+00	4.30e-01	1.38e-01	3.10
33.64−0.21	1.44	17.34	7.96e+00	3.94e-01	1.09e-01	3.60
35.02+0.35	1.77	17.50	2.55e+02	1.23e-02	4.09e-03	3.01
35.20−0.74	1.60	17.61	6.78e+00	4.62e-01	1.94e-01	2.38
35.20−1.74	2.36	17.73	1.64e+01	1.91e-01	6.26e-02	3.05
35.79−0.17	-1.90	18.44	1.43e+02	5.20e-03	4.40e-02	0.18
351.775−0.536	1.72	14.75	7.24e+00	4.33e-01	3.81e-02	11.38
36.10+0.56	2.05	18.06	2.96e+01	1.05e-01	2.82e-02	3.74
37.40+1.52	4.21	18.40	5.19e+00	6.05e-01	1.55e-01	3.90
38.26−0.08	0.25	18.17	3.36e+02	9.33e-03	4.71e-03	1.98
4.434+0.129	4.21	15.09	3.78e+02	8.31e-03	4.38e-03	1.89
43.87−0.77	0.265	18.70	5.24e+01	5.95e-02	2.07e-02	2.87
45.44+0.07	1.87	18.56	1.40e+02	2.23e-02	4.37e-03	5.10
52.20+07	3.99	18.63	3.93e+02	7.98e-03	4.39e-03	1.81
52.66−1.09	2.16	18.69	2.79e+02	1.12e-02	4.13e-03	2.71
06.610−0.082	1.79	14.61	3.29e+01	9.52e-02	3.91e-03	24.35
06.795−0.257	1.55	14.69	1.45e+01	2.15e-01	8.19e-02	2.62
69.52−0.97	2.13	17.87	7.19e+00	4.36e-01	7.77e-02	5.61
07.632−0.109	1.41	16.81	4.71e+02	6.68e-03	4.73e-03	1.51
08.139+0.226	2.06	16.64	2.45e+02	1.28e-02	4.60e-03	2.78
09.621+0.196	5.61	14.72	3.04e+00	1.03e+00	2.25e-01	4.58
94.58−1.79	7.61e+02	16.75	1.75e+02	7.59e-03	4.44e-03	1.71
G351.2+0	1.95	14.82	6.41e+01	4.89e-02	4.49e-03	10.88
G353.2+0	1.65e+03	14.55	4.71e+02	6.70e-03	4.18e-03	1.60
IRS22198	15.72	16.22	4.90e+02	6.41e-03	4.34e-03	1.47

表5.7 core, haloのvisibility ratio

次に上記したパラメータを用いて導出したhaloの推定サイズ、coreの上限サイズをまとめる。

	Gaussian - Halo		Gaussian - Core	
object name	R [AU]	R [mas]	R [AU]	R [mas]
10.205−0.345	340.34 ± 0.00	68.06	70.72 ± 0.00	14.14
10.287−0.125	316.00 ± 0.00	89.01	48.01 ± 0.00	13.52
10.323−0.160	205.18 ± 95.41	102.59	26.47 ± 12.31	13.23
10.320−0.259	219.61 ± 102.12	109.80	26.78 ± 12.45	13.39
11.109−0.114	-	-	49.32 ± 0.00	13.70
111.24−0.76	145.90 ± 11.79	43.68	42.11 ± 3.40	12.60
111.53+0.76	318.80 ± 0.00	113.85	35.40 ± 0.00	12.64
12.025−0.031	1195.70 ± 75.40	107.72	153.66 ± 9.69	13.84
12.625−0.017	220.23 ± 15.60	91.76	31.37 ± 2.22	13.07
121.28+0.65	69.96 ± 03.00	75.23	11.89 ± 0.51	12.79
123.05−6.31	355.90 ± 25.69	128.48	34.98 ± 2.52	12.63
13.657−0.599	383.27 ± 0.00	93.48	56.46 ± 0.00	13.77
14.631−0.577	-	-	25.58 ± 0.00	13.97
18.341+1.768	209.54 ± 0.00	104.77	27.70 ± 0.00	13.85
19.755−0.128	-	-	109.58 ± 0.00	13.69
192.60−0.05	-	-	17.37 ± 1.02	11.43
23.19−03	452.23 ± 0.00	90.44	68.31 ± 0.00	12.38
24.93+0.08	302.34 ± 30.33	101.11	36.97 ± 3.71	12.36
25.38−0.18	340.80 ± 138.84	126.22	32.25 ± 13.14	11.94
25.41+0.10	-	-	122.08 ± 0.00	12.85
25.65+1.04	257.84 ± 0.00	83.17	38.92 ± 0.00	12.55
25.82−0.17	550.45 ± 33.02	110.09	61.17 ± 3.67	12.23

	Gaussian - Halo		Gaussian - Core	
object name	R [AU]	R [mas]	R [AU]	R [mas]
26.52−0.26	-	-	114.92 ± 3.62	12.09
27.22+0.13	727.35 ± 0.00	95.70	96.54 ± 0.00	12.70
32.03+0.06	493.88 ± 19.14	95.71	64.61 ± 2.50	12.55
33.64−0.21	611.73 ± 66.90	95.58	76.12 ± 8.32	11.89
35.02+0.35	-	-	27.12 ± 2.35	11.79
35.20−0.74	310.73 ± 28.63	143.19	25.42 ± 2.34	11.71
35.20−1.74	364.74 ± 58.08	116.16	36.53 ± 5.81	11.63
35.79−0.17	-	-	39.16 ± 4.47	11.19
351.775−0.536	1516.42 ± 0.00	87.15	243.30 ± 0.00	13.98
36.10+0.56	-	-	106.21 ± 4.56	11.42
37.40+1.52	225.20 ± 09.58	119.78	21.07 ± 0.89	11.21
38.26−0.08	-	-	9.08 ± 4.54	11.35
43.87−0.77	-	-	48.54 ± 6.61	11.03
45.44+0.07	896.32 ± 11.01	110.11	90.50 ± 1.11	11.11
52.20+07	527.07 ± 0.00	51.63	112.97 ± 0.00	11.07
69.52−0.97	237.55 ± 07.72	96.56	28.39 ± 0.92	11.54
07.632−0.109	-	-	39.26 ± 7.36	12.26
08.139+0.226	1167.22 ± 39.90	99.76	145.08 ± 4.96	12.40
09.621+0.196	190.99 ± 22.03	36.72	72.86 ± 8.40	14.01
94.58−1.79	-	-	42.97 ± 3.69	12.31
IRS22198	9.09 ± 00.32	11.96	9.66 ± 0.34	12.72

表5.8 メタノールメーザー源のhalo,coreサイズ (gaussian fitting)

これらの結果より、本研究で観測したメーザー天体のうちvisibility-plotを作成できたのが43天体、放射領域サイズ(halo)を推定できたのは30天体あり、各天体のcoreサイズに対して上限をつけることができた。haloの平均サイズは 438.23 ± 42.71 [au]であり最大で 1168.22 ± 39.90 [au], 最小で 9.09 ± 0.32 [au]という結果になった。これはMinier et al. (2002)で議論されているhaloのサイズから大きく逸脱するものではないことから、天体のメーザースポットサイズを捉えることができていると考えられる。またcoreに関してはサイズを導出することはできなかったが、上限を設けることができた。こちらもMinier et al. (2002)で算出されているcoreのサイズを含んでいる。core, haloそれぞれのvisibility ratioの最低値は1.47、最大値は90.23と求められた。これは今後の追観測で、より長基線の干渉計観測をすることでcoreのサイズも同定していく必要があると考えられる。Visibility-plotのfittingに関してはsinc functionよりもgauss functionの方が複数の天体でfittingできている。このことから天体もgauss functionの輝度分布を持つと考えられる。しかし、fittingがうまくできずサイズ推定ができなかった天体やエラーバーが大きいplotもあることから、こういった天体のサイズ推定率を上げるための手段も考える必要がある。今後は第二エポックの観測を行いサイズを推定することで、放射領域サイズが時期によって変化しているかどうかを考えていく。

第6章

まとめ

本研究は6.7GHzメタノールメーザーの周期的・突発的な強度変動を既存の輝度変化モデルでは説明できないことから、その変動メカニズムが個々の放射領域サイズの変化に起因するものであるという仮定をたてた。メタノールメーザーの放射領域サイズはMinier et al. (2002)において、coreとhaloの二つの領域で構成されていると提唱されており、本研究ではスポットの輝度は一定として、core,haloのサイズが変化することで地上で観測されるメーザーフラックスが変化すると考えている。このモデルの場合、数日などの周期で発生する二桁以上の強度変動も説明することができると期待できる。

このサイズ変化モデルを検証する方法として、本研究では少数基線のVLBI観測を用いた。これは干渉計が広がった構造を持つ天体に対して感度を持たないことを利用するためである。コンパクトな天体をVLBI観測した場合、短基線・長基線で観測されるフラックスはともに一定である。一方、広がった構造を持つ天体を観測した場合には長基線になるにつれてフラックスは減少すると予測される。また少数基線であることから強度変動に合わせて機動性の高い観測を実現するためである。放射領域サイズを推定するためにはこのような基線長 vs フラックスのプロットを作成する必要があり、本研究ではMinier et al. (2002)と同様に横軸をuv-distance, 縦軸をビジビリティとしてvisibility-plotを作成した。これは天体の構造のスケールとuv-distance, フラックスとビジビリティがフーリエ変換の関係にある事を利用するためである。以上の方法でサイズ推定を行い、さらに天体の静穏期と増光期に合わせて追観測を行うことでサイズ変化を捉えることができる。

VLBI観測には日立32m, 高萩32m, 鹿島34m, 山口32mの四局を用い、コンパクトなキャリブレーター3天体とメタノールメーザー源56天体を観測した。rms評価を行なった自己相関スペクトルを用いて相互相関スペクトルのキャリブレーションを行なった。基線長に対しては回転行列と天体の A_z , E_l を用いてuv-distanceの導出を行なった。これらを用いてメーザーのピーク放射を検出することができた43天体に対してvisibility-plotを作成し、gaussianとsinc functionを用いてフィッティングを行なった。

結果として、gaussianでよくフィッティングでき、導出したhaloのサイズは先行論文で提唱されているhaloのサイズ範囲に収まる値であると考えられる。またcoreについてもサイズの上限値を推定することができ、こちらも先行論文のcoreのサイズを含むことがわかった。しかし、本観測だけでは導出サイズの妥当性、サイズ変化の有無については議論することができないため、追観測を行うことで検証を行っていく必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたりご指導、ご協力いただいた多くの皆様に感謝いたします。

指導教官である米倉覚則教授には観測のスケジュールや解析方法、科学的な考え方など細かいことまでご指導いただきました。私が自分自身で解決できていない課題や疑問点などを真摯に向き合っていていただくことで、自分自身の理解につながるとともに他者に対する説明の仕方など気付かせていただくことが多々ありました。大変お世話になりました。百瀬宗武教授にはゼミにおける内容から修士論文の執筆、発表スタイルにいたるまで幅広くご指導いただきました。また多くの学会発表の機会を与えていただくだけでなく、そのたびに細かな修正にお付き合いいただきマスターの学生として非常に有意義な経験を積むことができました。

現在、国立天文台にいらっしゃる塚越崇さまは毎回発表の練習を見ていただき、内容に関する指摘や機器の使用方法などを教えていただきました。

同じく国立天文台にいらっしゃる杉山孝一郎さま、本研究のアイデアは杉山さまからいただいたものであり研究の諸段階でアドバイスをいただきました。自分の考えている手法や解析が本当に元のモチベーションに沿ったものであるのかを確認するだけでなく、私の知らない解析方法やアイデアを提供していただき非常に助かりました。

VLBI観測の際にアンテナ運用を担当していただいた山口大学の藤沢健太教授、情報通信研究機構の岳藤一宏様。お忙しい中、日程を合わせていただきありがとうございます。必要なデータをすぐに用意していただくことができ、スムーズに研究を進めることができました。研究会などでお会いした際には私の疑問にお答えいただいたことは忘れません

研究員の齋藤悠さま、アンテナ運用の際に何度も助言をいただきました。メタノールメーザー天体に関しての質問や観測データの所在など不明な点を解決するためには齋藤さまの経験と知識をお借りすることが必要であったと実感しております。そして、研究員のSoon Kang-Louさま。常に研究室で私の抱える疑問点に対応していただきました。天体に関するサイエンス的な面から、解析方法の提案やそのアドバイス。なにより研究室の雰囲気や常にある良いものに変えていたのはSoonさまのお力だと思えます。

私は学部生のときに研究室の在籍していた先輩方、現在B4の後輩たち。みなさまのおかげで充実した研究生活を過ごすことができました。また研究の節々で協力していただいた田辺さま。研究に関する知識だけでなく、幅広い知識で常に研究室を引っ張っていただきありがとうございます。そして同期のメンバーたち。時に仲間であり、時にはよきライバルとして支え合ってきました。数年ではありますが研究生活を共にしてきたことを思い出していきたいと思えます。

そして、私の生活を支えてくれた家族にも感謝したいと思います。

皆様、ありがとうございます。

参考文献

- [1] Andreev, N., Araya, E. D., Hoffman, I. M., et al. 2017, *ApJS*, 232, 29
- [2] Arce, H. G., Shepherd, D., Gueth, F., et al. 2007, *Protostars and Planets V*, 245
- [3] Bartkiewicz, A., Szymczak, M., van Langevelde, H. J., Richards, A. M. S., & Pihlström, Y. M. 2009, *A&A*, 502, 155
- [4] Blitz, L., Fich, M., & Stark, A. A. 1982, *ApJS*, 49, 183
- [5] Blum, R. D., Damineli, A., & Conti, P. S. 2001, *AJ*, 121, 3149
- [6] Campbell, B., & Thompson, R. I. 1984, *ApJ*, 279, 650
- [7] Carey, S. J., Clark, F. O., Egan, M. P., et al. 1998, *ApJ*, 508, 721
- [8] Choi, Y. K., Hachisuka, K., Reid, M. J., et al. 2014, *ApJ*, 790, 99
- [9] Corbel, S., Wallyn, P., Dame, T. M., et al. 1997, *ApJ*, 478, 624
- [10] Cyganowski, C. J., Brogan, C. L., Hunter, T. R., & Churchwell, E. 2009, *ApJ*, 702, 1615
- [11] Cyganowski, C. J., Brogan, C. L., Hunter, T. R., & Churchwell, E. 2011, *ApJ*, 743, 56
- [12] Downes, D., Wilson, T. L., Bieging, J., & Wink, J. 1980, *A&AS*, 40, 379
- [13] Fish, V. L., Reid, M. J., Argon, A. L., & Menten, K. M. 2003, *ApJ*, 596, 328
- [14] Forster, J. R., & Caswell, J. L. 2000, *ApJ*, 530, 371
- [15] Fujisawa, K., Sugiyama, K., Aoki, N., et al. 2012, *PASJ*, 64, 17
- [16] Fujisawa, K., Aoki, N., Nagadomi, Y., et al. 2014, *PASJ*, 66, 109
- [17] Furness, J. P., Crowther, P. A., Morris, P. W., et al. 2010, *MNRAS*, 403, 1433
- [18] Georgelin, Y. M., & Georgelin, Y. P. 1976, *A&A*, 49, 57
- [19] Giannetti, A., Wyrowski, F., Brand, J., et al. 2014, *A&A*, 570, A65
- [20] Goedhart, S., Gaylard, M. J., & van der Walt, D. J. 2003, *MNRAS*, 339, L33
- [21] Green, J. A., & McClure-Griffiths, N. M. 2011, *MNRAS*, 417, 2500
- [22] He, Y.-X., Zhou, J.-J., Esimbek, J., et al. 2015, *MNRAS*, 450, 1926
- [23] Hirota, T., Ando, K., Bushimata, T., et al. 2008, *PASJ*, 60, 961
- [24] Immer, K., Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., & Dame, T. M. 2013, *A&A*, 553, A117
- [25] Inayoshi, K., Sugiyama, K., Hosokawa, T., Motogi, K., & Tanaka, K. E. I. 2013, *ApJ*, 769, L20
- [26] Johnstone, D., Fiege, J. D., Redman, R. O., Feldman, P. A., & Carey, S. J. 2003, *ApJ*, 588, L37
- [27] Maud, L. T., Moore, T. J. T., Lumsden, S. L., et al. 2015, *MNRAS*, 453, 645
- [28] Minier, V., Booth, R. S., & Conway, J. E. 2000, *A&A*, 362, 1093
- [29] Minier, V., Conway, J. E., & Booth, R. S. 2001, *A&A*, 369, 278

- [30] Minier, V., Booth, R. S., & Conway, J. E. 2002, *A&A*, 383, 614
- [31] Minier, V., Booth, R. S., Burton, M. G., & Pestalozzi, M. R. 2002, *Proceedings of the 6th EVN Symposium*, 205
- [32] Moises, A. P., Damineli, A., Figueredo, E., et al. 2011, *MNRAS*, 411, 705
- [33] Moscadelli, L., Reid, M. J., Menten, K. M., et al. 2009, *ApJ*, 693, 406
- [34] Reid, M. J., Menten, K. M., Zheng, X. W., et al. 2009, *ApJ*, 700, 137
- [35] Rosero, V., Hofner, P., McCoy, M., et al. 2014, *ApJ*, 796, 130
- [36] Rygl, K. L. J., Brunthaler, A., Reid, M. J., et al. 2010, *A&A*, 511, A2
- [37] Sanna, A., Reid, M. J., Moscadelli, L., et al. 2009, *ApJ*, 706, 464
- [38] Sanna, A., Reid, M. J., Menten, K. M., et al. 2014, *ApJ*, 781, 108
- [39] Sato, M., Hirota, T., Reid, M. J., et al. 2010, *PASJ*, 62, 287
- [40] Soria-Ruiz, R., Alcolea, J., Colomer, F., et al. 2004, *A&A*, 426, 131
- [41] Sridharan, T. K., Beuther, H., Schilke, P., Menten, K. M., & Wyrowski, F. 2002, *ApJ*, 566, 931
- [42] Sugiyama, K., Fujisawa, K., Doi, A., et al. 2008, *PASJ*, 60, 23
- [43] Szymczak, M., Wolak, P., Bartkiewicz, A., & van Langevelde, H. J. 2011, *A&A*, 531, L3
- [44] Szymczak, M., Wolak, P., & Bartkiewicz, A. 2014, *MNRAS*, 439, 407
- [45] Szymczak, M., Wolak, P., & Bartkiewicz, A. 2015, *MNRAS*, 448, 2284
- [46] Urquhart, J. S., Moore, T. J. T., Schuller, F., et al. 2013, *MNRAS*, 431, 1752
- [47] Urquhart, J. S., Thompson, M. A., Moore, T. J. T., et al. 2013, *MNRAS*, 435, 400
- [48] Vallée, J. P. 2018, *ApJ*, 863, 52
- [49] van der Walt, D. J., Goedhart, S., & Gaylard, M. J. 2009, *MNRAS*, 398, 961
- [50] van der Walt, D. J. 2011, *AJ*, 141, 152
- [51] Vlemmings, W. H. T., Goedhart, S., & Gaylard, M. J. 2009, *A&A*, 500, L9
- [52] Walsh, A. J., Hyland, A. R., Robinson, G., & Burton, M. G. 1997, *VizieR Online Data Catalog*, 729,
- [53] Wenger, T. V., Balser, D. S., Anderson, L. D., & Bania, T. M. 2018, *ApJ*, 856, 52
- [54] Wienen, M., Wyrowski, F., Menten, K. M., et al. 2015, *A&A*, 579, A91
- [55] Zhang, B., Zheng, X. W., Reid, M. J., et al. 2009, *ApJ*, 693, 419
- [56] 青木健吾, 2017, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
- [57] 佐藤宏樹, 2016, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
- [58] 永瀬桂, 2013, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
- [59] 森智彦, 2013, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
- [60] 宮本裕輔, 2016, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
- [61] 安井靖堯, 2013, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
- [62] 山口貴大, 2017, 茨城大学大学院理工学研究科修士論文

付録A

相関処理によって求められた遅延残差, 残差変化率,SNR

object name	Delay (μ sec)	Rate (ps/s)	SNR				
0.167−0.446	−2.601	−51.605	33.3	26.52−0.26	−3.167	−24.103	34.2
10.205−0.345	0	−0.036	121.5	27.22+0.13	−0.34	−0.015	62.1
10.287−0.125	−0.004	0.017	300.6	32.03+0.06	0.294	0.019	225.3
10.320−0.259	0.005	−0.043	49.2	33.64−0.21	−0.379	−0.039	46.8
10.323−0.160	−0.003	0.035	869	35.02+0.35	−3.144	−21.367	35.1
11.109−0.114	−2.591	−55.438	33.6	35.20−0.74	−0.248	−0.01	214.4
111.24−0.76	−2.497	−13.801	37.4	35.20−1.74	0	0.007	1188.4
111.53+0.76	0.05	−0.002	756.2	35.79−0.17	−3.188	−7.395	35.8
12.025−0.031	0.018	−0.091	81.9	351.775−0.536	−0.2	0.035	129.4
12.625−0.017	0.01	0.04	50.6	36.10+0.56	0.332	0.02	50.8
121.28+0.65	−2.393	−17.669	42.5	37.40+1.52	0.56	−0.026	81.6
123.05−6.31	−0.373	−0.012	52.4	38.26−0.08	−3.166	−12.142	37.2
13.657−0.599	0.001	0.01	73.9	4.434+0.129	0.002	−0.025	40.9
14.230−0.509	−2.598	−56.109	32.6	43.87−0.77	0	−0.048	231.2
14.33−0.63	−2.483	−56.724	33	45.44+0.07	0	0.009	886.2
14.631−0.577	−2.752	−53.388	32.8	52.20+07	−3.709	−2.643	38
174.19−0.09	−0.063	−0.006	47	52.66−1.09	−3.086	−0.363	36.2
18.341+1.768	−0.202	−0.021	51.6	53.62+0.04	−3.067	2.931	37.6
19.755−0.128	−2.664	−56.055	34.2	06.539−0.108	−0.001	−0.01	187.9
192.60−0.05	−1.972	−51.12	35	06.610−0.082	0.004	−0.044	68.6
213.70−12.6	0.002	−0.04	1428.9	06.795−0.257	−0.095	−0.033	161.1
23.19−0.38	−0.567	0.011	104.1	69.52−0.97	−0.004	−0.043	56.2
24.93+0.08	0.005	0.012	49	07.632−0.109	−2.235	−51.082	33.8
25.38−0.18	0	−0.012	1267.9	08.139+0.226	0	0.004	324.4
25.41+0.10	−3.068	−36.153	34.4	09.621+0.196	0.205	−0.008	3385.7
25.65+1.04	1.415	0.094	40.7	94.58−1.79	−2.639	−15.475	38.9
25.82−0.17	−0.326	−0.038	139.4	G351.2+0	0	0.041	1537.1
				G353.2+0	−2.65	−48.538	36.3
				IRS22198	−2.457	−9.718	43.7

表A.1 日立-高萩基線における遅延残差、残差変化率,SNR

object name	Delay (μsec)	Rate (ps/s)	SNR
0.167−0.446	−2.567	10.918	5.5
10.205−0.345	105.163	−1.154	6.3
10.287−0.125	−4.853	−8.357	12.2
10.320−0.259	15.681	−0.035	6
10.323−0.160	−2.658	−0.039	171.1
11.109−0.114	2.751	0.006	7.8
111.24−0.76	92.012	70.057	5.9
111.53+0.76	−2.397	−0.057	64.6
12.025−0.031	0.202	−0.131	17.1
12.625−0.017	−2.862	−0.094	9.4
121.28+0.65	47.84	−65.116	5.8
123.05−6.31	12.501	−0.033	12.5
13.657−0.599	−8.924	−0.016	13.3
14.230−0.509	−117.286	−49.599	6.1
14.33−0.63	−85.875	0.279	5.7
14.631−0.577	52.744	−39.877	5.7
174.19−0.09	−5.404	−3.325	9.3
18.341+1.768	−6.53	−0.007	14.1
19.755−0.128	119.621	69.809	5.5
192.60−0.05	−21.377	−0.113	64.3
213.70−12.6	5.679	0.012	21.6
23.19−0.38	−0.734	−0.044	17.1
24.93+0.08	−118.586	24.667	6.2
25.38−0.18	−95.514	69.843	5.8
25.41+0.10	5.94	−70.29	6.4
25.65+1.04	7.625	0.163	10.3
25.82−0.17	−9.268	−0.377	19.8

26.52−0.26	−121.247	33.444	5.6
27.22+0.13	−2.232	−0.256	12
32.03+0.06	−1.409	0.351	45
33.64−0.21	15.998	−2.652	9.1
35.02+0.35	9.772	−0.009	6.9
35.20−0.74	12.713	0.041	25.2
35.20−1.74	1.529	−0.221	11.9
35.79−0.17	−4.304	−0.05	6.7
351.775−0.536	−0.294	−0.219	21
36.10+0.56	−0.74	−0.711	10.2
37.40+1.52	−8.607	−1.567	11.6
38.26−0.08	18.732	72.76	5.7
4.434+0.129	−0.607	−64.697	6.1
43.87−0.77	−4.403	−0.497	6.5
45.44+0.07	−40.916	16.115	5.6
52.20+07	66.791	46.252	5.7
52.66−1.09	74.888	12.013	6
53.62+0.04	−118.899	65.338	5.9
06.539−0.108	−2.57	32.709	5.2
06.610−0.082	−1.176	74.77	25.2
06.795−0.257	−0.05	−0.107	30.5
69.52−0.97	−8.629	−0.016	7.7
07.632−0.109	−19.109	55.351	5.8
08.139+0.226	243.254	−3.759	5.8
09.621+0.196	−8.83	−0.071	635.8
94.58−1.79	68.689	−25.067	6.4
G351.2+0	0.066	−3.844	5.2
G353.2+0	0.564	36.055	5.5
IRS22198	74.584	−46.114	6.2

表A.2 日立-鹿島基線における遅延残差、残差変化率,SNR

object name	Delay (μ sec)	Rate (ps/s)	SNR
0.167−0.446	−65.618	16.373	5.7
10.205−0.345	−2.301	34.648	5.9
10.287−0.125	−2.769	−8.3	11
10.320−0.259	8.911	56.554	5.8
10.323−0.160	−2.797	−0.17	16.2
11.109−0.114	12.343	−0.326	6.4
111.24−0.76	−79.811	−37.911	6.3
111.53+0.76	−2.936	−0.061	65.9
12.025−0.031	−1.652	−0.053	16.6
12.625−0.017	−0.232	−0.052	9.1
121.28+0.65	−16.962	33.153	6
123.05−6.31	7.431	−0.077	12.8
13.657−0.599	−6.13	−0.053	13
14.230−0.509	−41.946	35.693	6
14.33−0.63	70.979	49.828	5.6
14.631−0.577	−81.361	−46.776	6.3
174.19−0.09	−0.822	−3.345	10.1
18.341+1.768	0.832	−0.036	13.2
19.755−0.128	−65.886	7.053	6.1
192.60−0.05	15.29	41.087	5.9
213.70−12.6	2.49	0.019	22.2
23.19−0.38	−0.729	−0.057	16.2
24.93+0.08	−69.147	−71.834	5.6
25.38−0.18	−7.217	−55.093	5.8
25.41+0.10	102.408	50.694	5.7
25.65+1.04	19.782	−0.11	10.8
25.82−0.17	−7.892	−0.336	20.1

26.52−0.26	23.44	−40.669	5.7
27.22+0.13	−4.524	−0.246	12.3
32.03+0.06	−0.753	0.32	44.1
33.64−0.21	14.617	−2.848	9.1
35.02+0.35	85.941	−1.429	5.9
35.20−0.74	13.76	0.032	26.3
35.20−1.74	5.631	−0.275	12.7
35.79−0.17	1.505	0.009	7.1
351.775−0.536	1.143	−0.262	21.6
36.10+0.56	0.266	−0.808	8.7
37.40+1.52	−10.83	−1.378	12.8
38.26−0.08	−8.604	−69.197	5.8
4.434+0.129	−85.464	−63.622	5.5
43.87−0.77	101.481	−65.947	6.1
45.44+0.07	−58.164	−38.912	6
52.20+07	−79.311	66.879	5.8
52.66−1.09	−63.001	−1.643	5.8
53.62+0.04	−42.181	3.442	6.1
06.539−0.108	82.609	72.464	6.4
06.610−0.082	−19.169	0.03	6.2
06.795−0.257	−0.295	−0.093	29.4
69.52−0.97	21.614	−0.294	8.2
07.632−0.109	112.663	24.893	5.9
08.139+0.226	89.864	−4.401	5.8
09.621+0.196	−8.117	−0.077	620.8
94.58−1.79	9.428	−48.651	6.1
G351.2+0	0.069	−3.876	6.8
G353.2+0	4.886	−47.531	6.1
IRS22198	4.677	−18.165	5.6

表A.3 高萩-鹿島基線における遅延残差、残差変化率,SNR

object name	Delay (μsec)	Rate (ps/s)	SNR
0.167−0.446	−75.436	8.239	5.5
10.205−0.345	62.383	55.196	5.6
10.287−0.125	75.121	43.724	6.7
10.320−0.259	−56.558	−51.53	5.5
10.323−0.160	25.642	21.595	5.8
11.109−0.114	127.923	−66.236	6.1
111.24−0.76	56.028	−50.128	5.8
111.53+0.76	−22.02	−5.239	8.4
12.025−0.031	6.431	−2.474	6.4
12.625−0.017	−59.447	−34.492	5.9
121.28+0.65	8.019	38.455	5.6
123.05−6.31	−22.898	−4.66	5.8
13.657−0.599	−46.399	2.967	6.1
14.230−0.509	25.786	−46.465	6.3
14.33−0.63	−71.866	23.699	5.7
14.631−0.577	100.748	65.941	6.6
174.19−0.09	−49.502	18.44	6.1
18.341+1.768	−27.092	26.66	5.6
19.755−0.128	−9.093	69.689	5.5
192.60−0.05	2.108	0.041	16.2
213.70−12.6	−23.578	26.133	6.5
23.19−0.38	102.14	1.223	5.8
24.93+0.08	30.036	−36.315	5.5
25.38−0.18	112.737	42.175	6
25.41+0.10	26.823	−34.24	5.9
25.65+1.04	26.556	35.587	6.1
25.82−0.17	53.42	17.924	6

26.52−0.26	−86.987	−46.889	5.6
27.22+0.13	−105.946	−12.584	5.6
32.03+0.06	−8.538	0.511	10.6
33.64−0.21	−43.001	−53.554	5.5
35.02+0.35	87.352	−48.596	5.9
35.20−0.74	−38.448	−7.667	8.1
35.20−1.74	24.163	35.864	6
35.79−0.17	8.67	18.072	5.8
351.775−0.536	88.859	−30.127	5.9
36.10+0.56	−4.698	23.466	5.9
37.40+1.52	14.864	−74.479	5.8
38.26−0.08	22.963	−55.336	5.7
4.434+0.129	−97.609	13.708	5.8
43.87−0.77	−29.666	−30.69	5.6
45.44+0.07	4.643	−47.711	5.7
52.20+07	85.454	−57.429	5.5
52.66−1.09	107.757	68.921	5.7
53.62+0.04	7.639	−18.968	6.1
06.539−0.108	−71	52.239	6
06.610−0.082	−100.797	29.334	5.8
06.795−0.257	9.894	−5.208	8.3
69.52−0.97	26.803	32.052	5.6
07.632−0.109	−63.759	−31.063	6
08.139+0.226	−70.655	39.862	5.7
09.621+0.196	5.891	−3.277	4.3
94.58−1.79	−123.196	0.002	5.8
G351.2+0	2.143	−36.702	5.8
G353.2+0	20.852	−42.775	5.5
IRS22198	−127.723	−21.44	5.5

表A.4 鹿島-山口基線における遅延残差、残差変化率,SNR

object name	Delay (μ sec)	Rate (ps/s)	SNR
0.167−0.446	98.037	1.773	5.8
10.205−0.345	12.387	25.274	5.8
10.287−0.125	−1.758	−6.124	6.6
10.320−0.259	−25.888	9.878	6.1
10.323−0.160	−16.823	−6.447	11.4
11.109−0.114	−8.6547	−1.777	6.9
111.24−0.76	44.705	−33.742	5.9
111.53+0.76	−6.666	−5.31	23.2
12.025−0.031	9.554	−3.06	20.4
12.625−0.017	−120.246	−22.771	5.9
121.28+0.65	48.25	73.635	5.8
123.05−6.31	−8.113	−4.738	11.4
13.657−0.599	32.776	−5.292	10.6
14.230−0.509	65.595	−2.287	6.2
14.33−0.63	−119.956	40.118	5.6
14.631−0.577	15.255	−72.915	5.5
174.19−0.09	−39.639	−35.796	5.9
18.341+1.768	−51.058	−3.764	11.8
19.755−0.128	−19.781	−53.035	5.7
192.60−0.05	−22.895	−0.06 5	3.9
213.70−12.6	−32.31	−0.868	12.3
23.19−0.38	8.364	−4.744	8.4
24.93+0.08	83.121	−60.728	6
25.38−0.18	−69.687	−52.47	5.5
25.41+0.10	26.577	−51.229	6
25.65+1.04	−40.964	−6.69	10.3
25.82−0.17	−5.86	−7.388	18.7

26.52−0.26	−71.07	24.362	5.6
27.22+0.13	−3.516	−7.394	10.5
32.03+0.06	6.845	0.905	37.5
33.64−0.21	5.638	−56.109	9.6
35.02+0.35	36.029	0.882	5.5
35.20−0.74	−18.563	−7.652	29.5
35.20−1.74	15.507	−7.859	12.3
35.79−0.17	1.553	−8.204	9.8
351.775−0.536	22.663	−2.047	9.2
36.10+0.56	−4.614	−22.595	9.7
37.40+1.52	18.847	−59.211	14.3
38.26−0.08	−89.489	15.475	6
4.434+0.129	−22.766	−29.111	6.4
43.87−0.77	5.104	−8.476	7.5
45.44+0.07	34.085	−5.925	5.5
52.20+07	−6.835	−33.738	5.7
52.66−1.09	121.236	−65.349	5.7
53.62+0.04	13.71	2.616	5.5
06.539−0.108	−65.614	−42.725	5.6
06.610−0.082	−3.245	−17.891	6.1
06.795−0.257	22.951	−5.282	27.8
69.52−0.97	−0.776	−7.614	6.7
07.632−0.109	110.115	−59.521	5.7
08.139+0.226	−74.575	−4.775	5.9
09.621+0.196	−3.396	−3.339	318.7
94.58−1.79	108.505	38.352	5.4
G351.2+0	84.312	8.674	6.2
G353.2+0	−19.8	−68.861	5.7
IRS22198	−90.978	71.632	6.7

表A.5 日立-山口基線における遅延残差、残差変化率,SNR

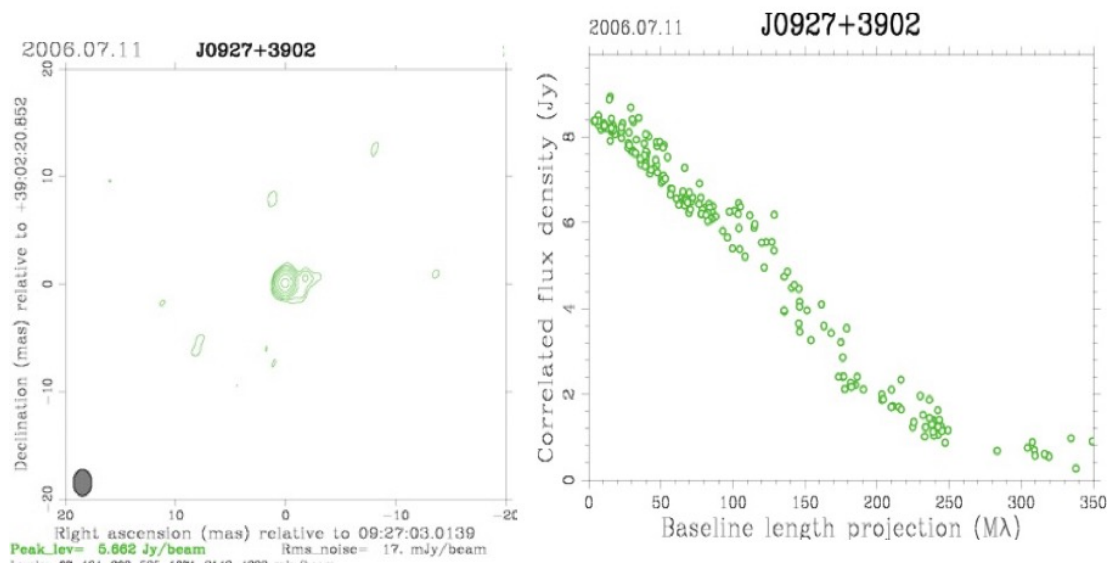
object name	Delay (μsec)	Rate (ps/s)	SNR
0.167−0.446	−27.724	−48.369	5.9
10.205−0.345	73.586	−39.362	5.5
10.287−0.125	−10.605	−5.868	6.5
10.320−0.259	−90.273	43.416	5.7
10.323−0.160	−15.815	−6.482	12
11.109−0.114	6.9	−1.957	7
111.24−0.76	−11.14	−5.558	5.7
111.53+0.76	−11.706	−5.293	23.1
12.025−0.031	12.971	−2.81	20
12.625−0.017	30.29	51.237	6.1
121.28+0.65	21.506	31.436	6
123.05−6.31	0.192	−4.744	11.1
13.657−0.599	−1.544	−5.265	10.3
14.230−0.509	−28.49	26.09	5.3
14.33−0.63	42.13	−48.685	5.7
14.631−0.577	−14.17	19.708	5.7
174.19−0.09	−29.33	40.364	6.1
18.341+1.768	49.123	−3.743	12.1
19.755−0.128	−70.414	−51.567	5.5
192.60−0.05	−68.584	−57.716	6.1
213.70−12.6	−30.636	−0.79	13
23.19−0.38	7.987	−4.81	9.1
24.93+0.08	−109.606	59.468	5.8
25.38−0.18	−100.517	−58.651	6
25.41+0.10	−33.411	56.558	5.6
25.65+1.04	−33.582	−6.86	10.1
25.82−0.17	−4.684	−7.329	18.5

26.52−0.26	−2.154	44.223	5.6
27.22+0.13	5.684	−7.373	9.2
32.03+0.06	7.463	0.872	37.1
33.64−0.21	5.411	−56.282	10
35.02+0.35	87.916	−5.293	5.5
35.20−0.74	−22.954	−7.647	30.2
35.20−1.74	13.101	−7.82	13.1
35.79−0.17	−2.346	−8.182	10.1
351.775−0.536	3.429	−1.949	9
36.10+0.56	−0.346	−22.52	9.5
37.40+1.52	16.471	−59.269	15.6
38.26−0.08	−25.987	0.335	5.8
4.434+0.129	82.188	67.062	5.9
43.87−0.77	14.346	−8.307	6.8
45.44+0.07	−105.887	64.196	5.9
52.20+07	−32.327	−14.367	5.6
52.66−1.09	13.467	6.0	36.3
53.62+0.04	124.5	−21.688	5.3
06.539−0.108	−104.011	−28.675	6.1
06.610−0.082	95.602	−58.887	5.8
06.795−0.257	23.192	−5.26	26.2
69.52−0.97	11.332	−6.836	6.7
07.632−0.109	114.132	−16.398	5.8
08.139+0.226	2.306	35.759	5.3
09.621+0.196	−2.988	−3.324	319.1
94.58−1.79	66.979	−16.962	5.6
G351.2+0	89.204	−53.317	6
G353.2+0	−87.497	−36.623	5.6
IRS22198	60.069	−48.322	5.8

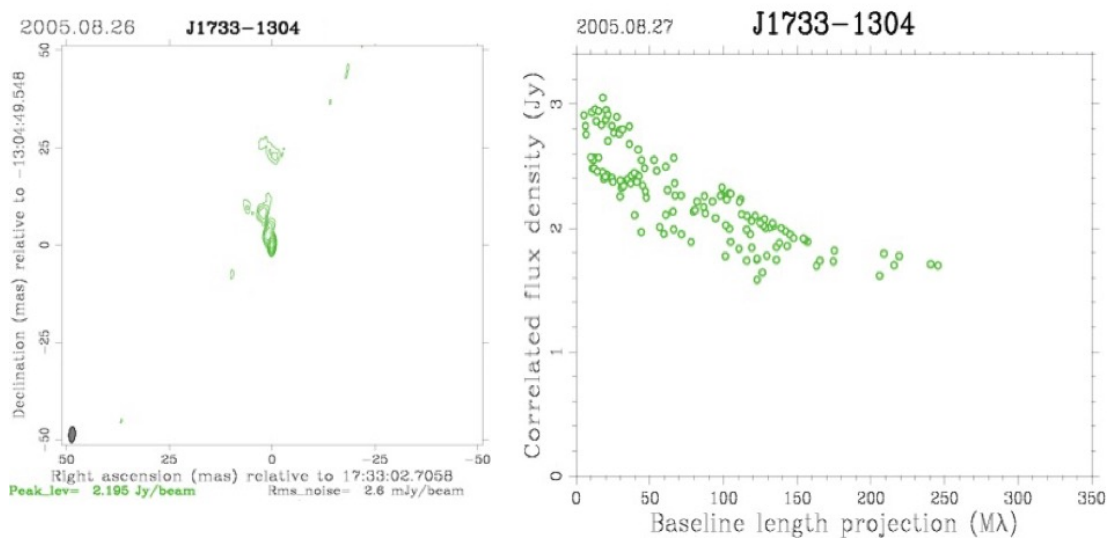
表A.6 高萩-山口基線における遅延残差、残差変化率,SNR

付録B

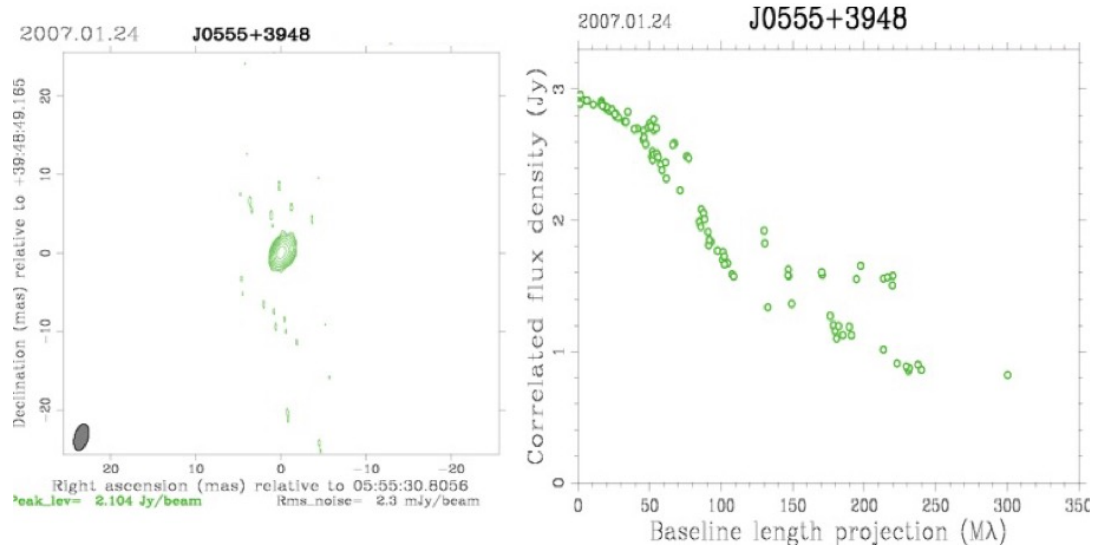
キャリブレーションの clean-map, visibility-map



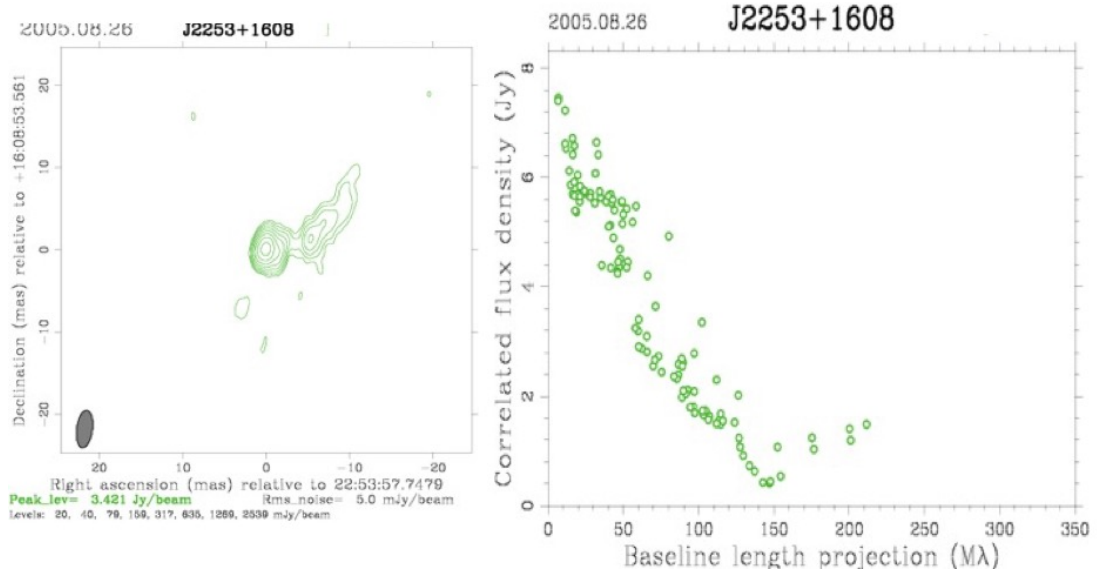
図B.1 J0927+3902のclean-map, visibility-map



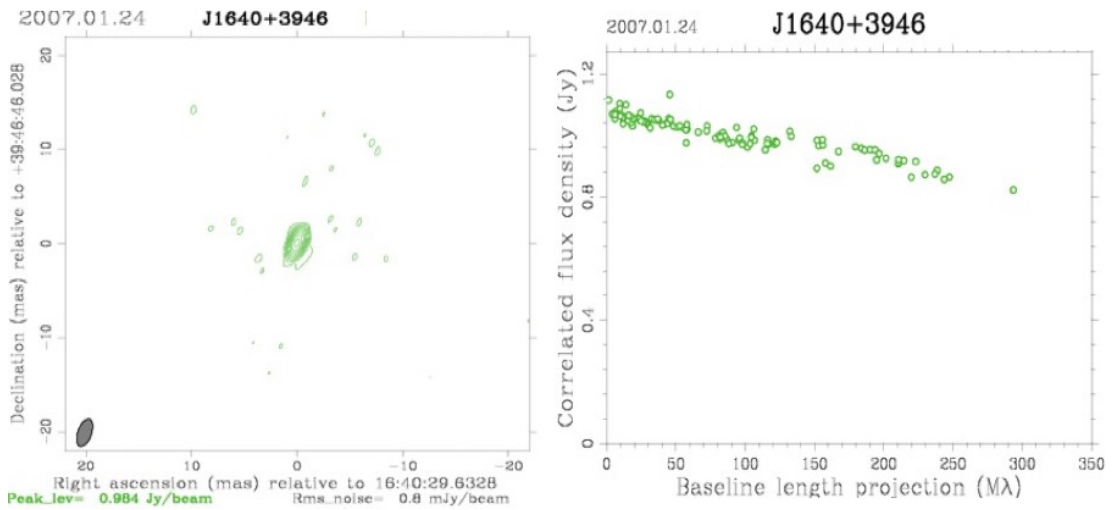
図B.2 J1733-1304のclean-map, visibility-map



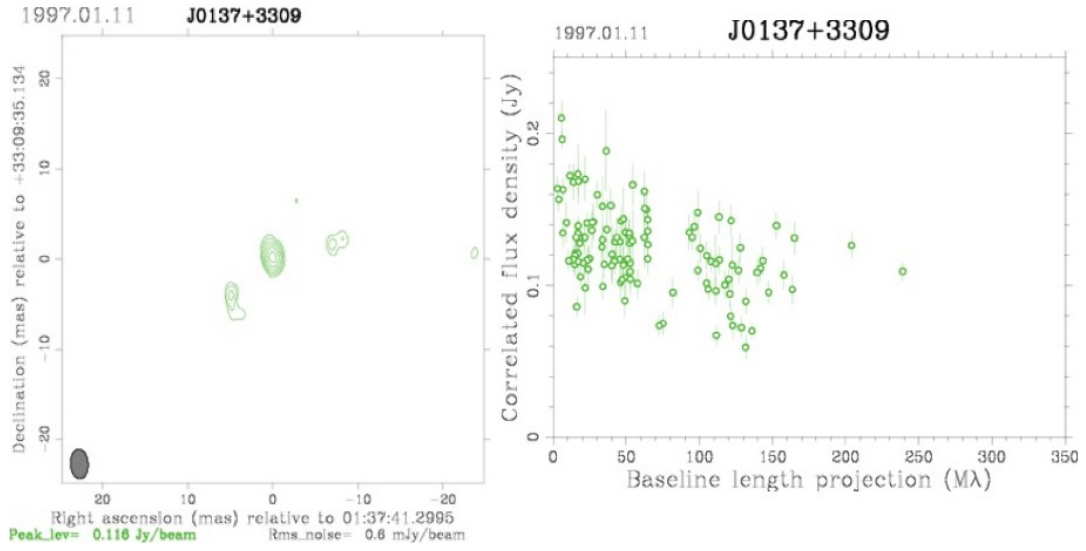
図B.3 J0555+3948のclean-map,visibility-map



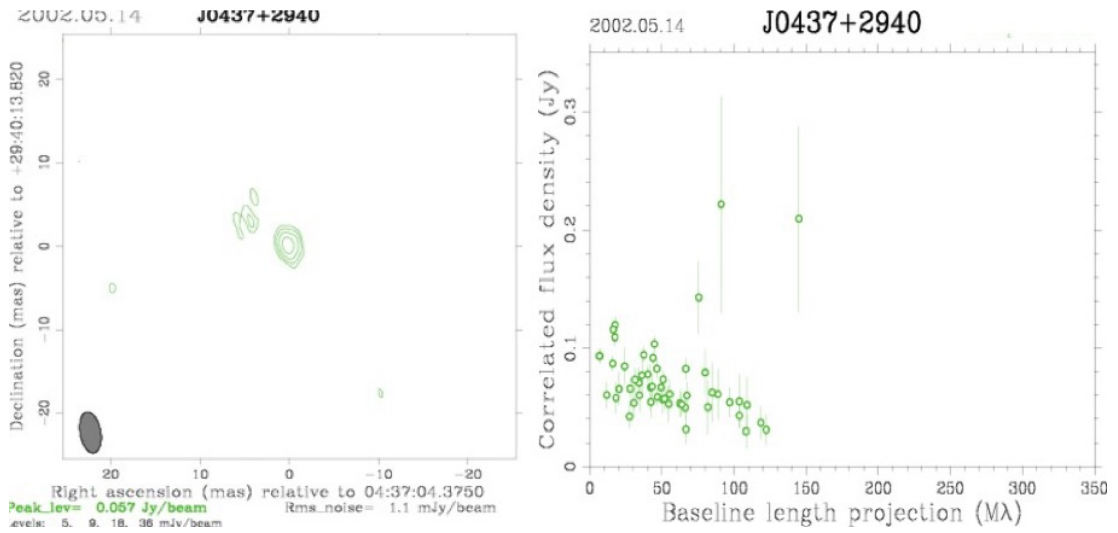
図B.4 J2253+1608のclean-map,visibility-map



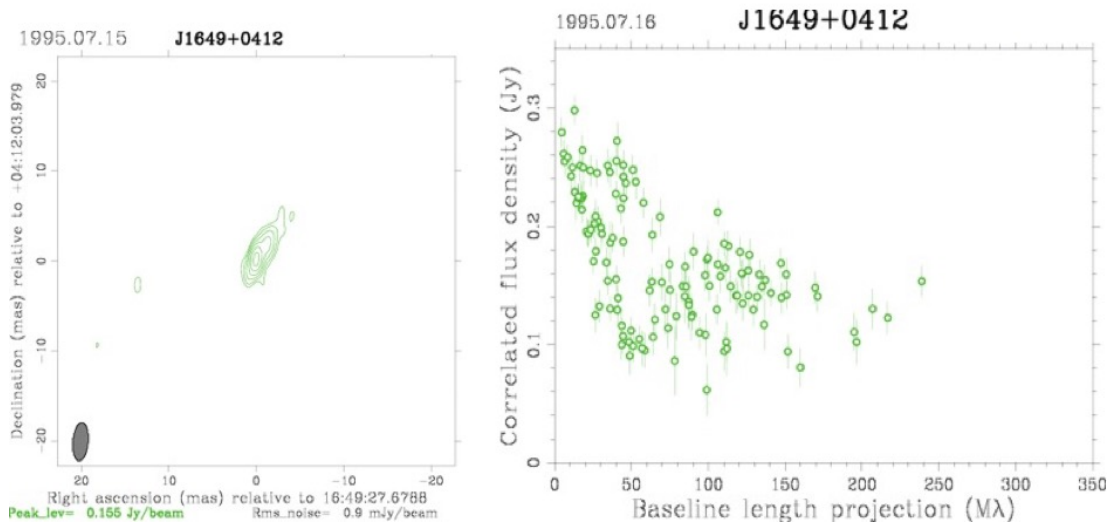
図B.5 J1640+3946のclean-map,visibility-map



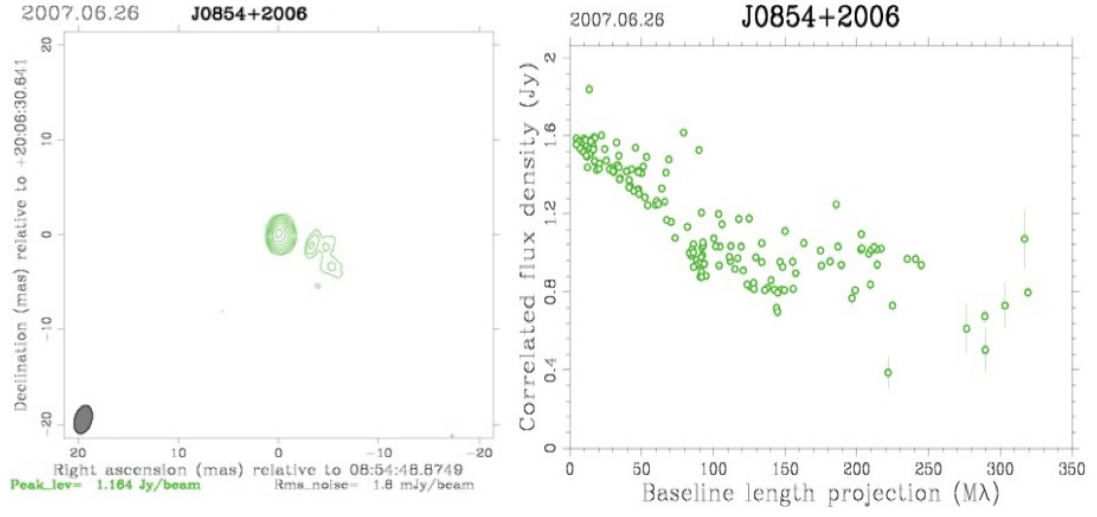
図B.6 J0137+3309のclean-map,visibility-map



図B.7 J0437+2940のclean-map,visibility-map



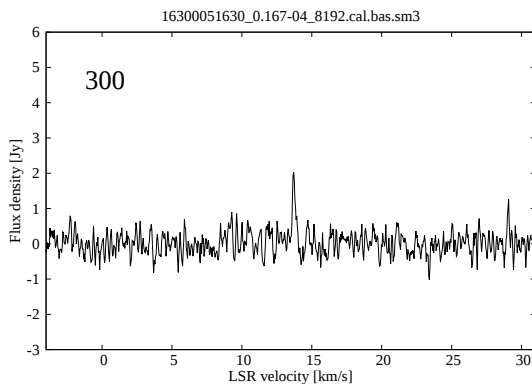
図B.8 J1649+0412のclean-map,visibility-map



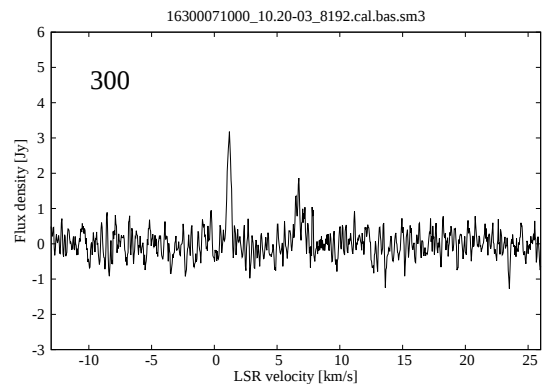
図B.9 J0854+2206のclean-map,visibility-map

付録C

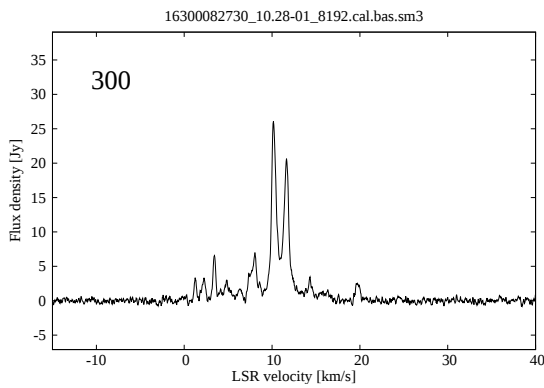
日立32m単一鏡観測によるスペクトル



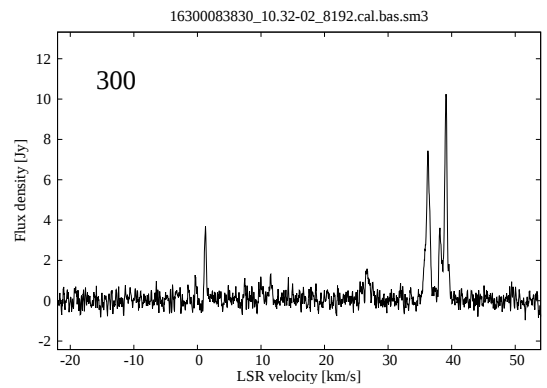
[1]0.167-0.446の単一鏡スペクトル



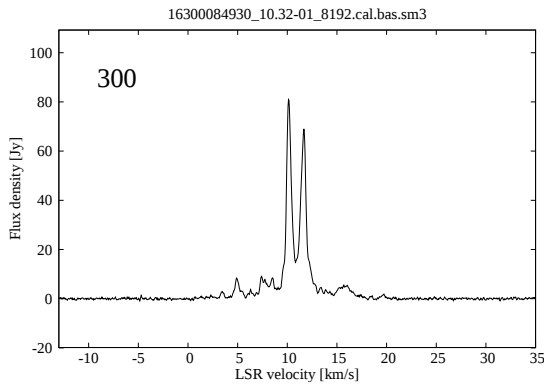
[2]10.205-0.345の単一鏡スペクトル



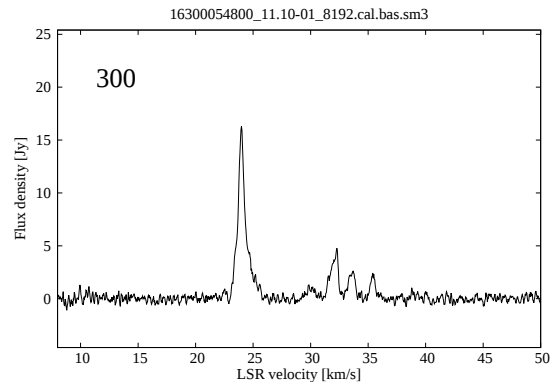
[3]10.287-0.125の単一鏡スペクトル



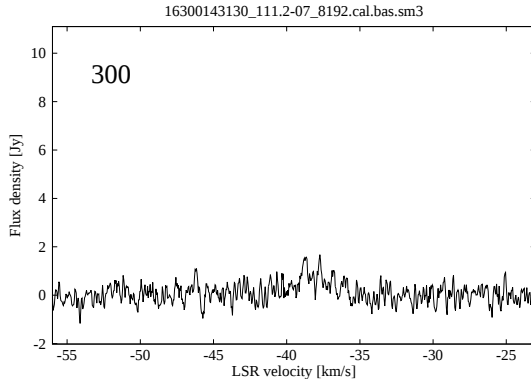
[4]10.320-0.259の単一鏡スペクトル



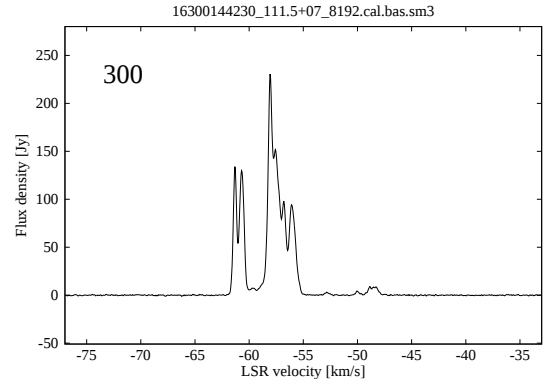
[5]10.323-0.160の単一鏡スペクトル



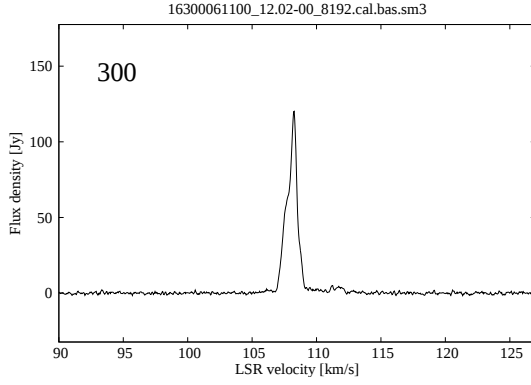
[6]11.109-0.114の単一鏡スペクトル



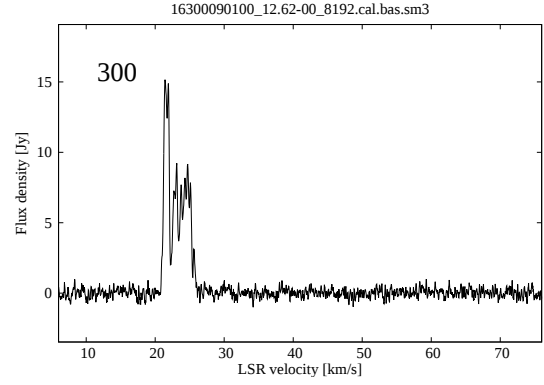
[7]111.24-0.76の単一鏡スペクトル



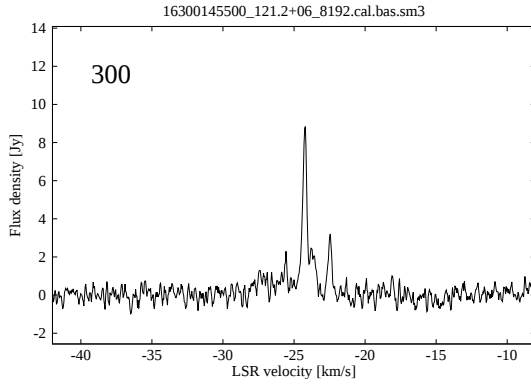
[8]111.53+0.76の単一鏡スペクトル



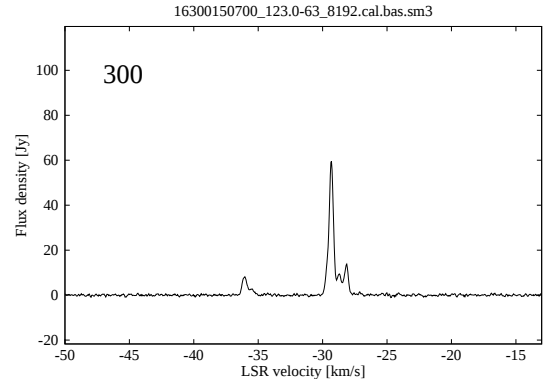
[9]12.025-0.031の単一鏡スペクトル



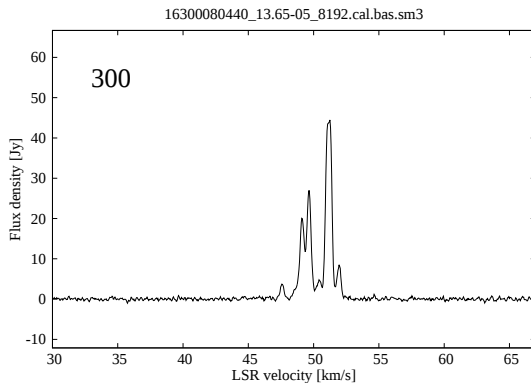
[10]12.625-0.017の単一鏡スペクトル



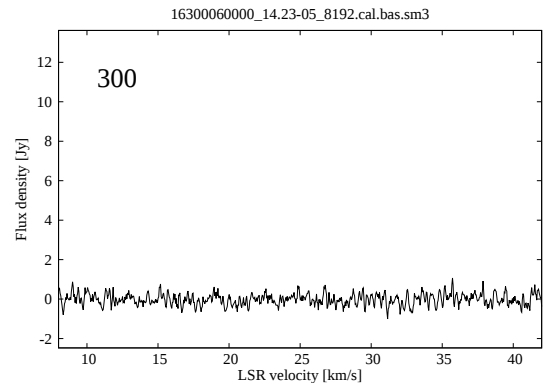
[11]121.28+0.65の単一鏡スペクトル



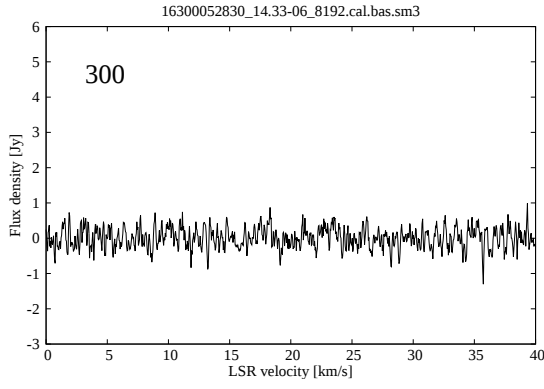
[12]123.05-6.31の単一鏡スペクトル



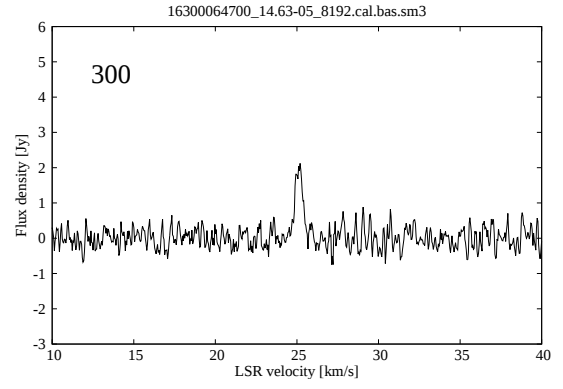
[13]13.657-0.599の単一鏡スペクトル



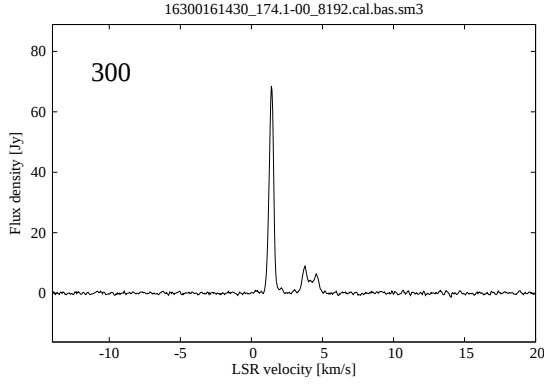
[14]14.230-0.509の単一鏡スペクトル



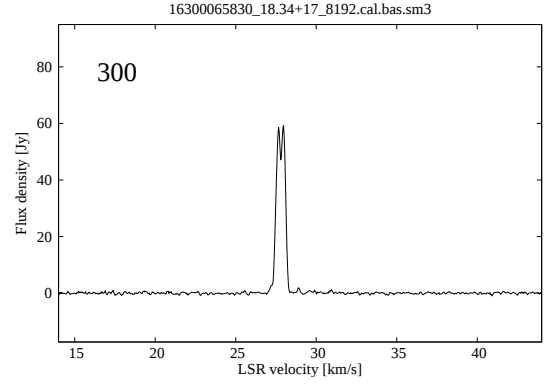
[15]14.33-0.63の単一鏡スペクトル



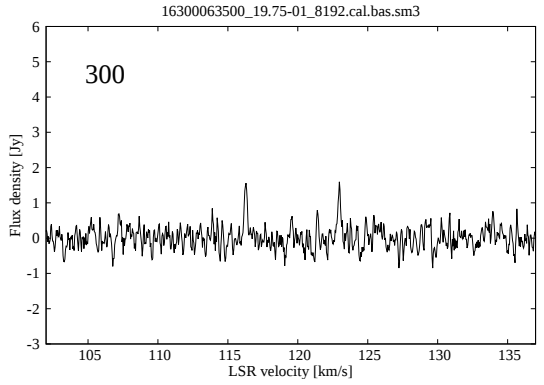
[16]14.631-0.577の単一鏡スペクトル



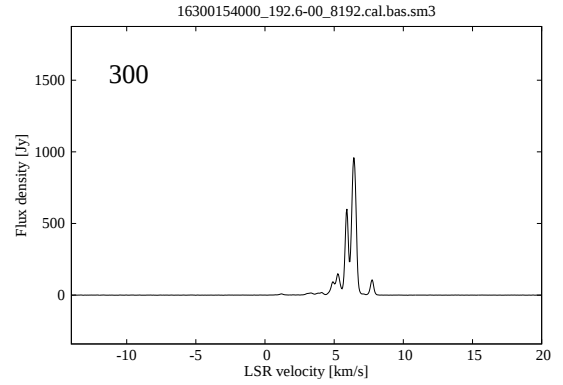
[17]174.19-0.09の単一鏡スペクトル



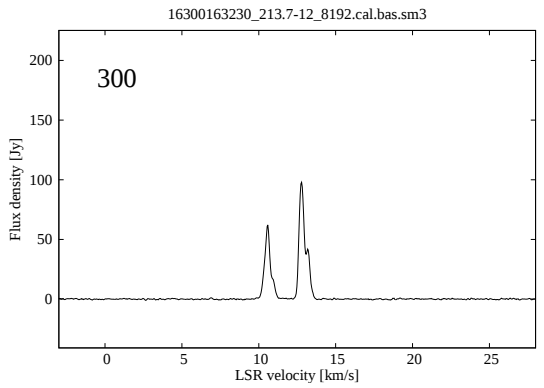
[18]18.341+1.768の単一鏡スペクトル



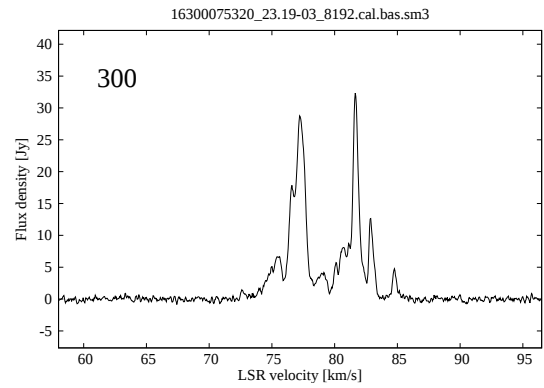
[19]19.755-0.128の単一鏡スペクトル



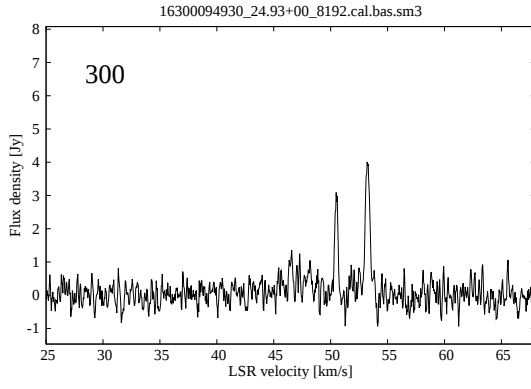
[20]192.60-0.05の単一鏡スペクトル



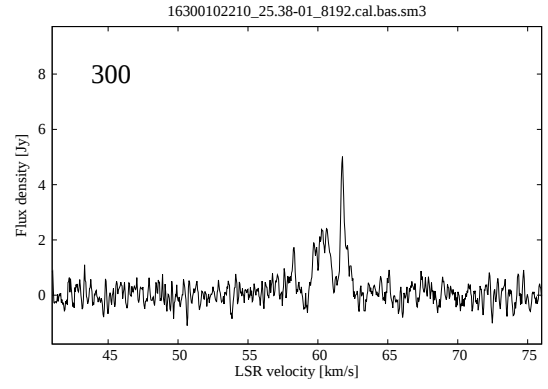
[21]213.70-12.6の単一鏡スペクトル



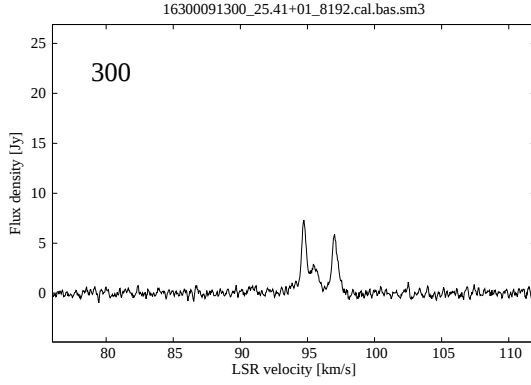
[22]23.19-0.38の単一鏡スペクトル



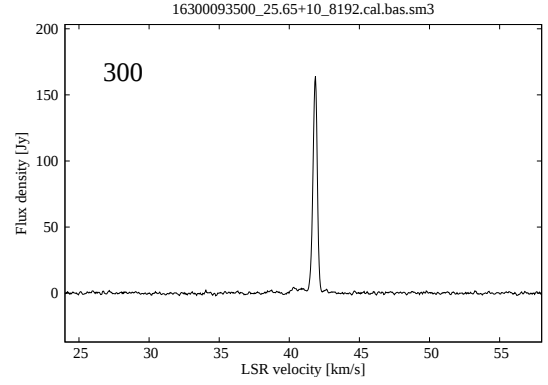
[23]24.93+0.08の単一鏡スペクトル



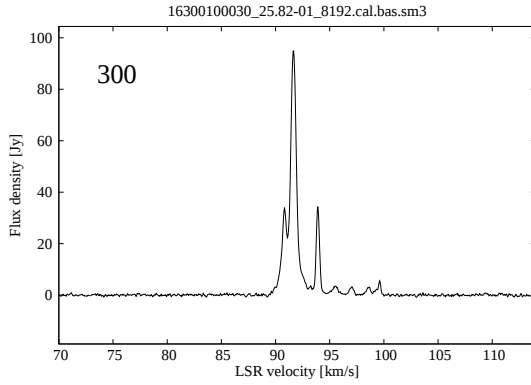
[24]25.38-0.18の単一鏡スペクトル



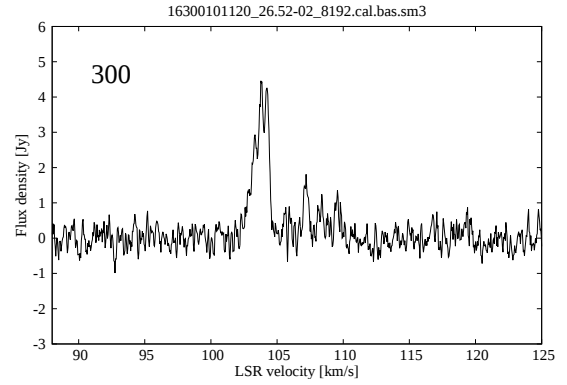
[25]25.41+0.10の単一鏡スペクトル



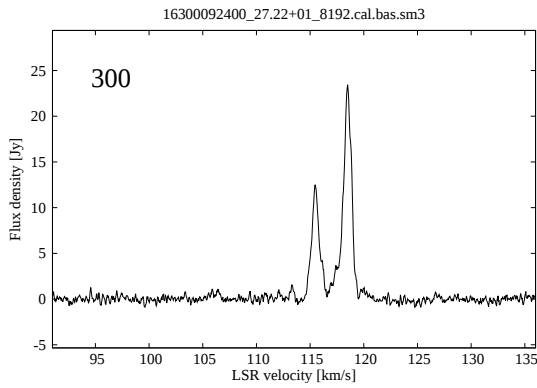
[26]25.65+1.04の単一鏡スペクトル



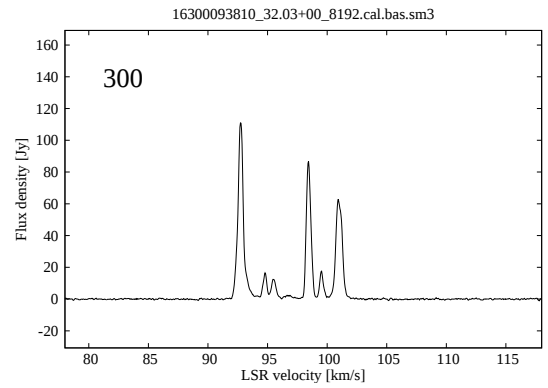
[27]25.82-0.17の単一鏡スペクトル



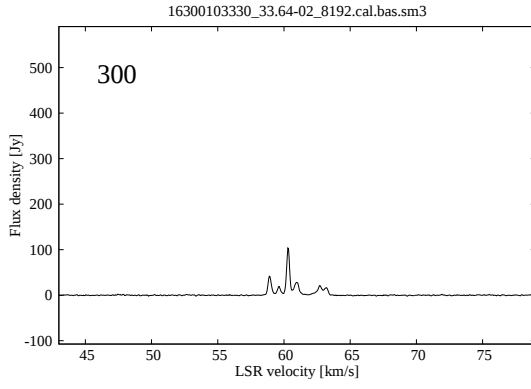
[28]26.52-0.26の単一鏡スペクトル



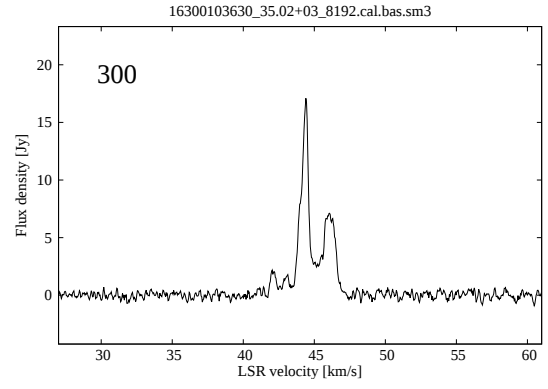
[29]27.22+0.13の単一鏡スペクトル



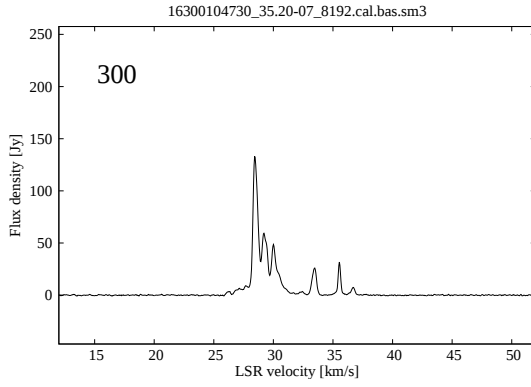
[30]32.03+0.06の単一鏡スペクトル



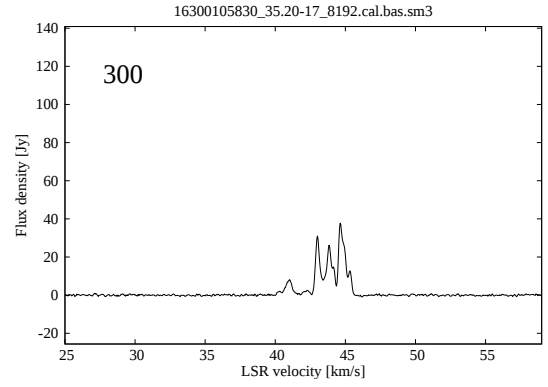
[31]33.64-0.21の単一鏡スペクトル



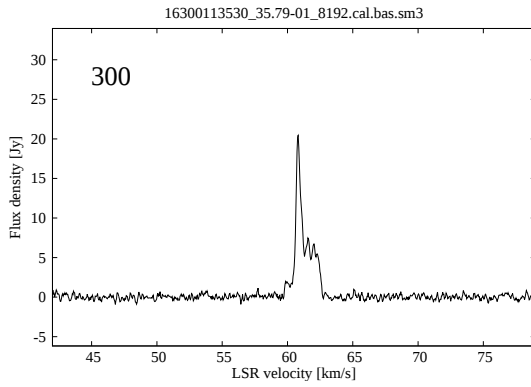
[32]35.02+0.35の単一鏡スペクトル



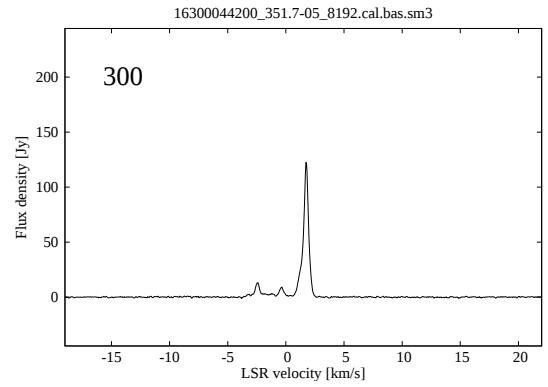
[33]35.20-0.74の単一鏡スペクトル



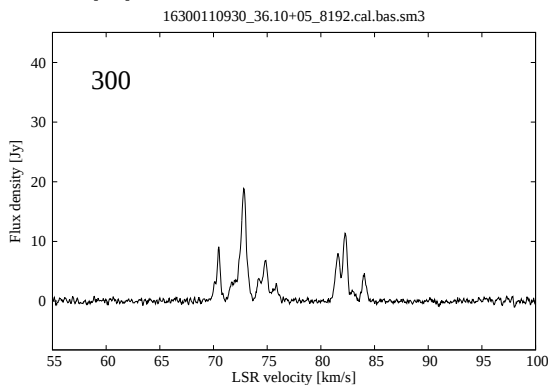
[34]35.20-1.74の単一鏡スペクトル



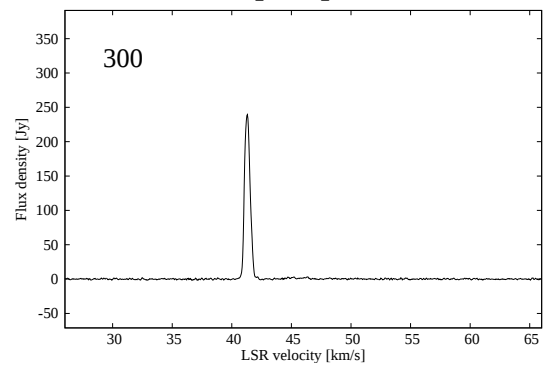
[35]35.79-0.17の単一鏡スペクトル



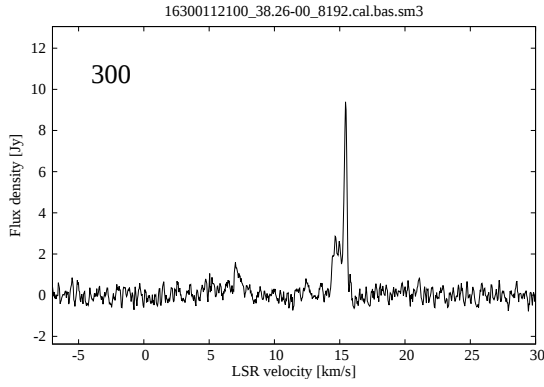
[36]351.775-0.536の単一鏡スペクトル



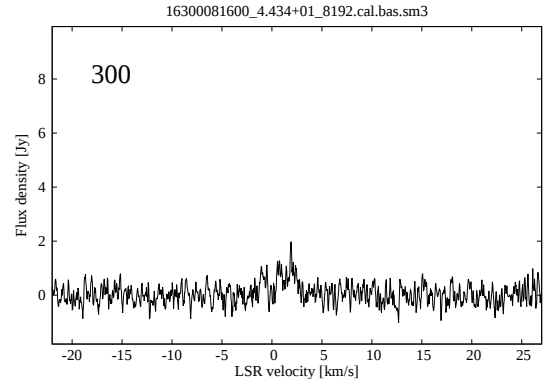
[37]36.10+0.56の単一鏡スペクトル



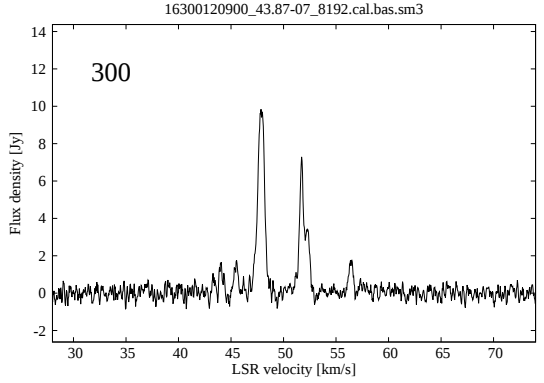
[38]37.40+1.52の単一鏡スペクトル



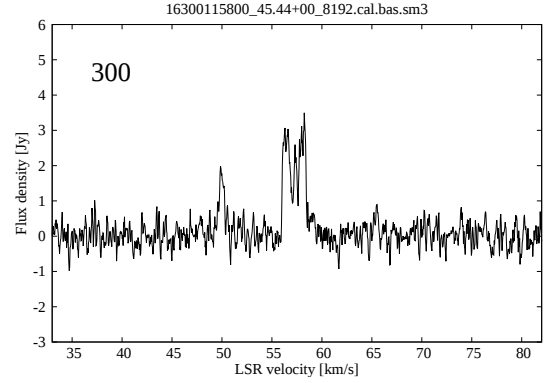
[39]38.26-0.08の単一鏡スペクトル



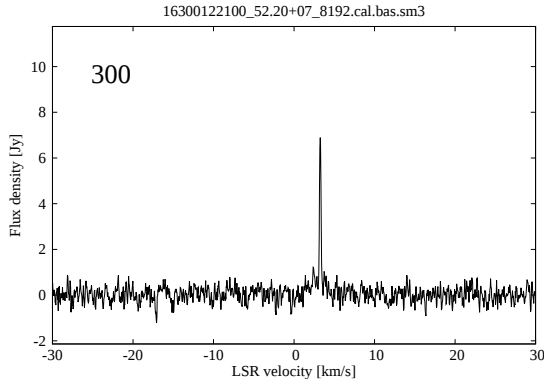
[40]4.434+0.129の単一鏡スペクトル



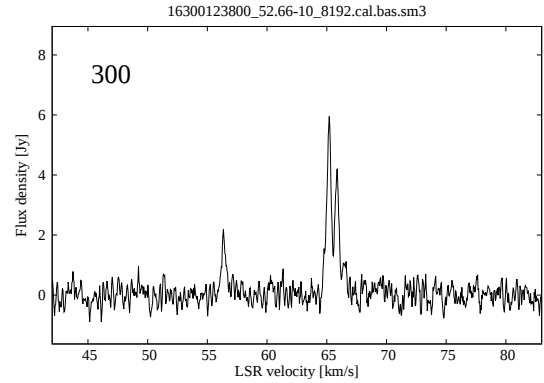
[41]43.87-0.77の単一鏡スペクトル



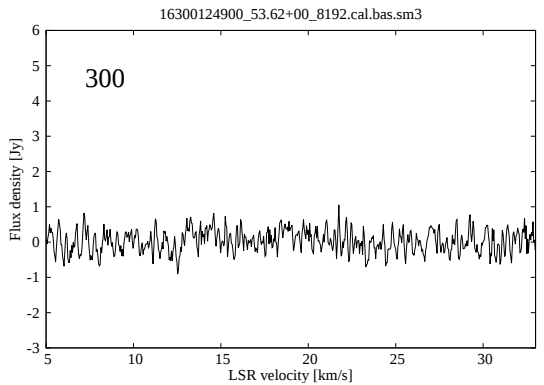
[42]45.44+0.07の単一鏡スペクトル



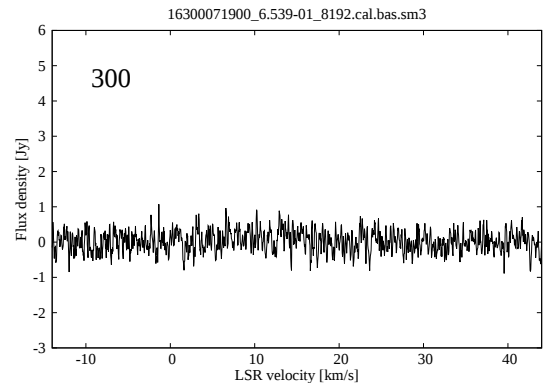
[43]52.20+0.07の単一鏡スペクトル



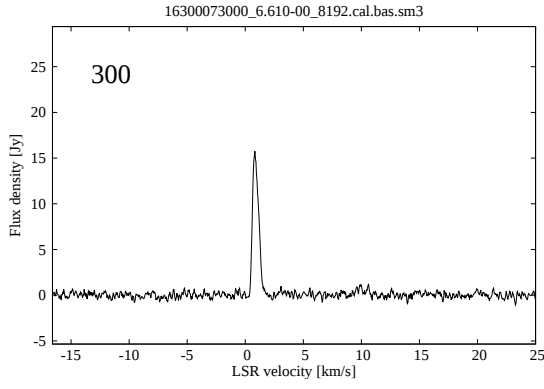
[44]52.66-1.09の単一鏡スペクトル



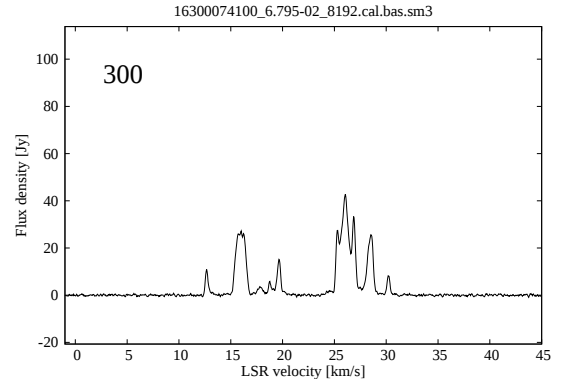
[45]53.62+0.04の単一鏡スペクトル



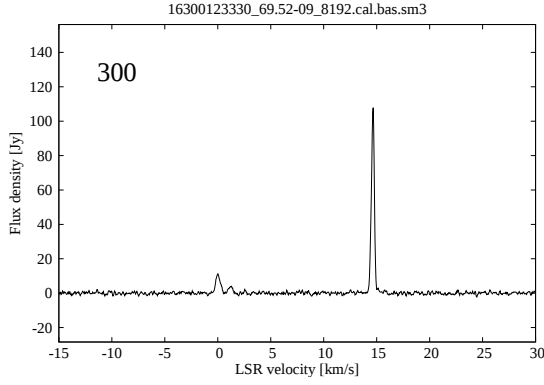
[46]06.539-0.108の単一鏡スペクトル



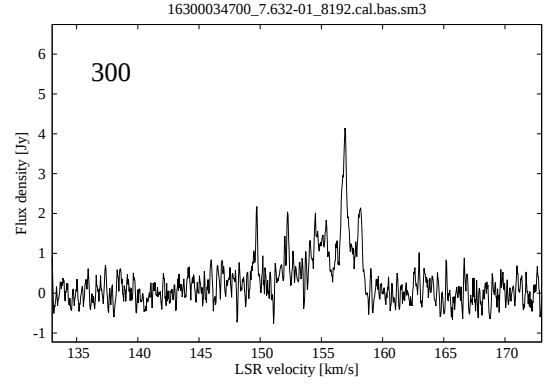
[47]06.610-0.082の単一鏡スペクトル



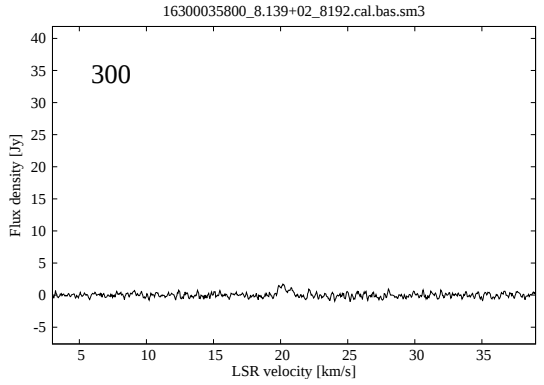
[48]06.795-0.257の単一鏡スペクトル



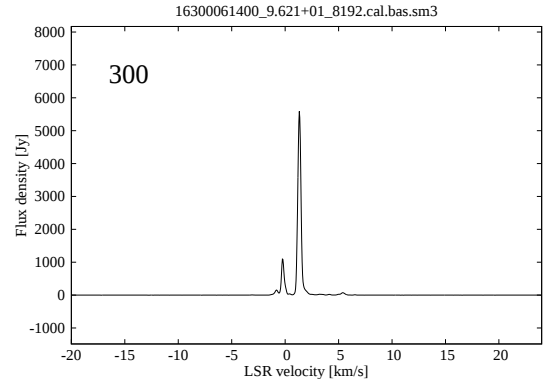
[49]69.52-0.97の単一鏡スペクトル



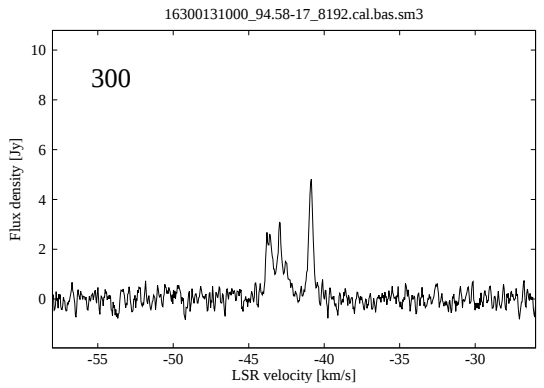
[50]07.632-0.109の単一鏡スペクトル



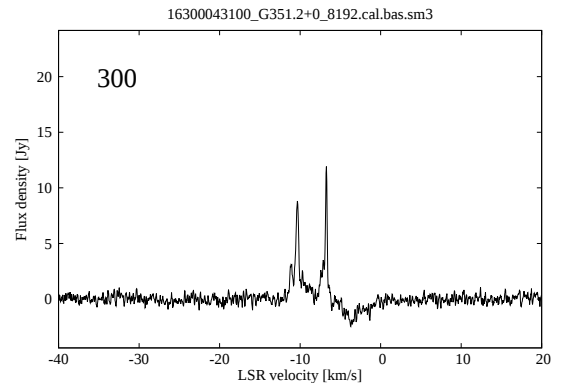
[51]08.139+0.226の単一鏡スペクトル



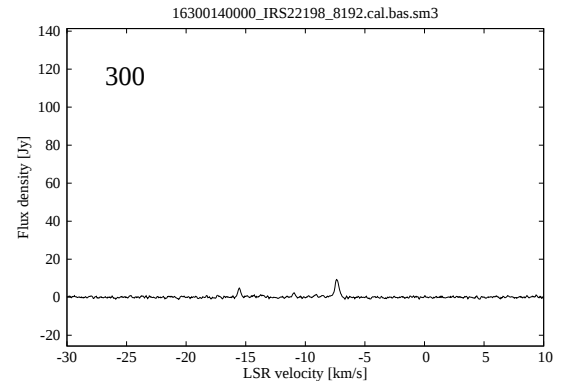
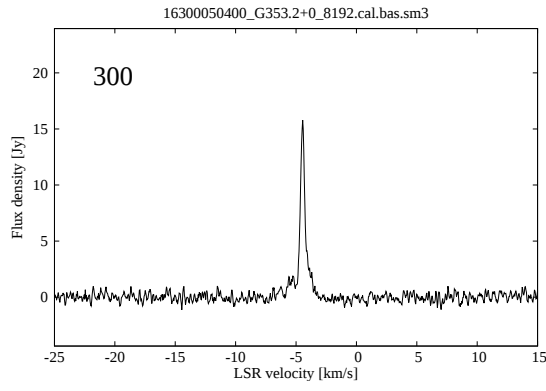
[52]09.621+0.196の単一鏡スペクトル



[53]94.58-1.79の単一鏡スペクトル



[54]G351.2+0の単一鏡スペクトル



[55]G353.2+0の単一鏡スペクトル

[56]IRS22198の単一鏡スペクトル

図C.1 観測天体の日立単一鏡スペクトル

付録D

観測された周波数とLSR速度との変換

メタノールメーザーの静止周波数は $f_0 = 6668.5192$ MHzである。相関処理によって得られた 909.62 ± 0.196 の自己相関、相互相関スペクトルのメーザー放射はIF(Intermediate frequency) = 4.2MHz。これは、RF(Radio frequency)では $f_{\text{obs}} = 6668.2$ MHzに相当する。

$$df \equiv f_{\text{obs}} - f_0 = -0.3192 \text{ MHz} \quad (\text{D.1})$$

とする。このdfをドップラー効果を用いて(その瞬間の観測地点から見た)視線速度に変換すると*1

$$V_{\text{obs}} = -1 \times \left(\frac{df}{f_0} \right) \times c = 14.35 \text{ km/s} \quad (\text{D.2})$$

になる。

観測地点がLSRに対して動いている運動 V_{tel} 、上で求めた V_{obs} と、LSRに対する天体の視線速度 V_{lsr} との間には $V_{\text{lsr}} = V_{\text{obs}} - V_{\text{tel}}$ という関係がある。 V_{tel} の計算は非常に複雑であるが、以下のweb pageで計算ツールが提供されているので、それを利用する。

http://neutronstar.joataman.net/technical/radial_vel_calc.html

9.621-0.019を日立局で観測した場合、

UTCに観測日時をUTで入力：26/10/2016 06:14:00

RAに天体の赤経：18 06 14.6

DECに天体の赤緯：-20 31 32.

Latに日立局の緯度：36 41 50.

Lonに日立局の経度：140 41 31.(Eをクリック)

calc radial vel をクリックすると

$$\text{Radial vel (km/s)} = +12.47 \quad (\text{D.3})$$

と計算される。よって、

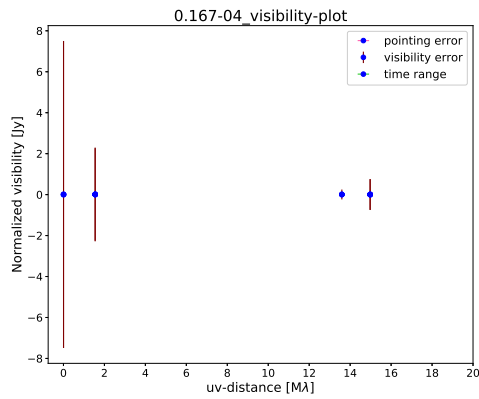
$$V_{\text{lsr}} = V_{\text{obs}} - V_{\text{tel}} = 14.35 - 12.47 = 1.88 \text{ km/s} \quad (\text{D.4})$$

となり、単一鏡の観測結果とほぼ同じになる。

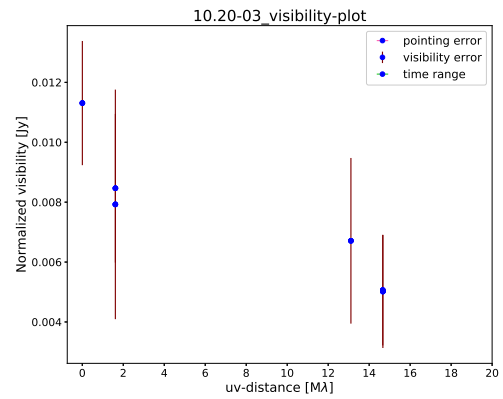
*1 $c = 2.997 \times 10^5 \text{ km/s}$

付録E

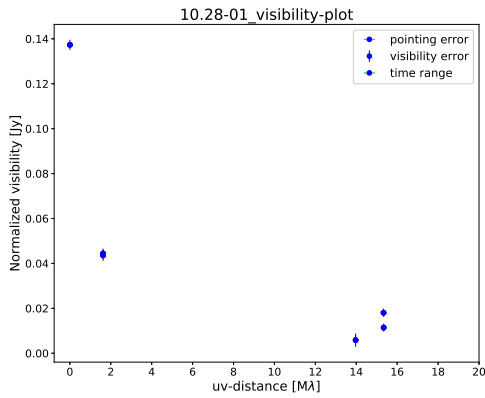
visibility-plot



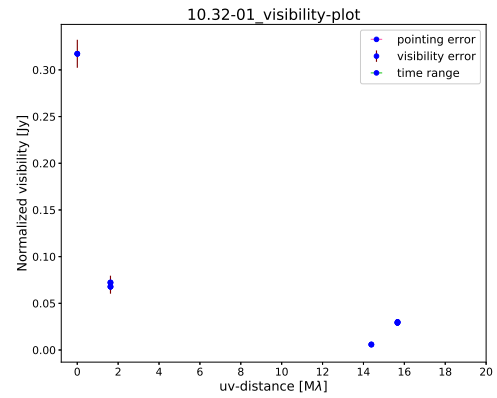
[1]0.167-0.446のvisibility-plot



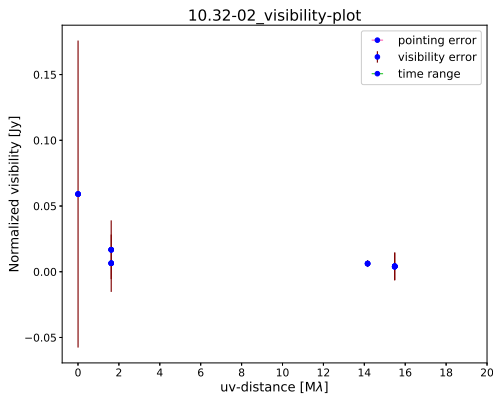
[2]10.205-0.345のvisibility-plot



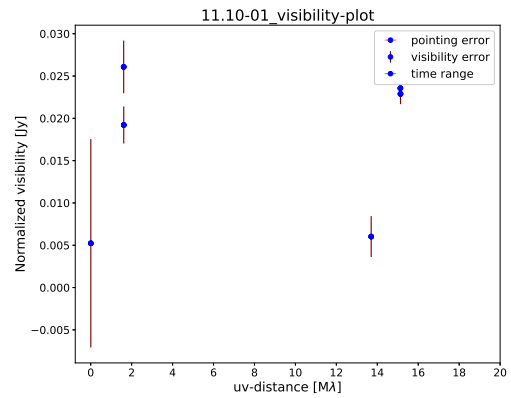
[3]10.287-0.125のvisibility-plot



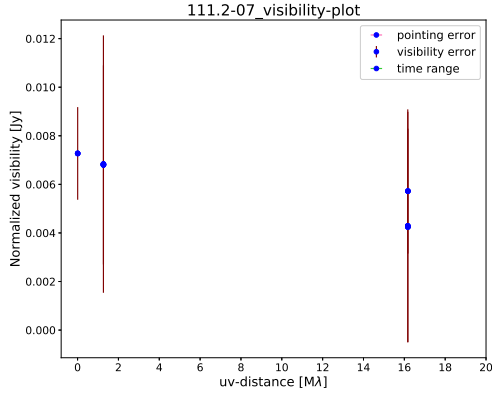
[4]10.323-0.160のvisibility-plot



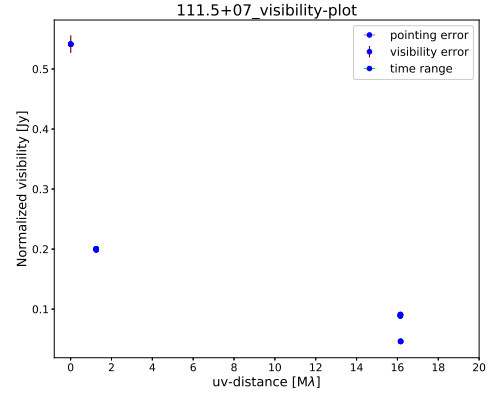
[5]10.320-0.259のvisibility-plot



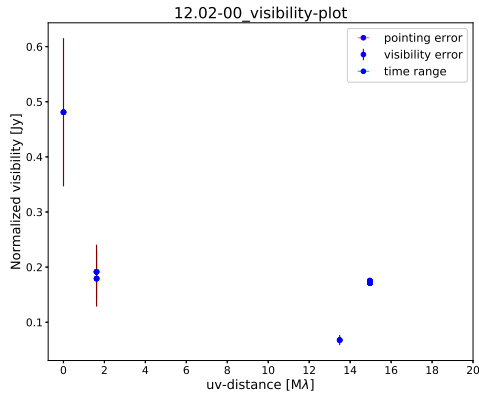
[6]11.109-0.114のvisibility-plot



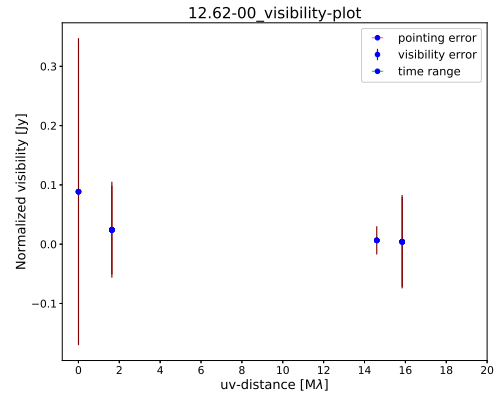
[7] 111.24-0.76のvisibility-plot



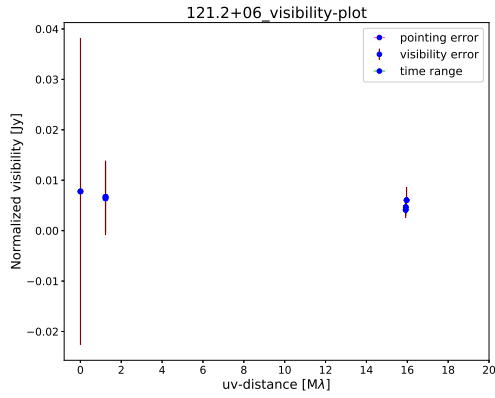
[8] 111.53+0.76のvisibility-plot



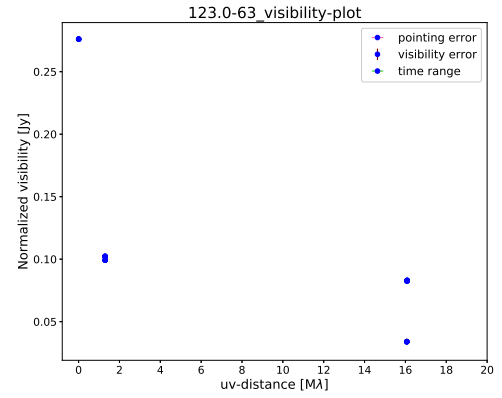
[9] 12.025-0.031のvisibility-plot



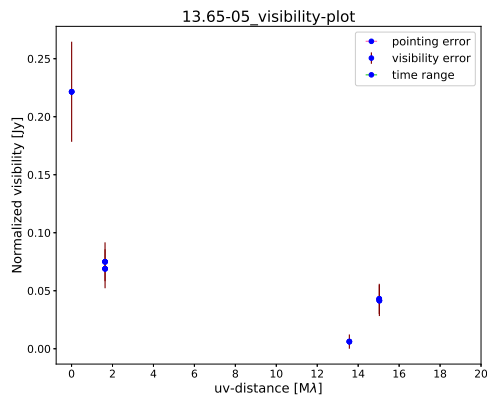
[10] 12.625-0.017のvisibility-plot



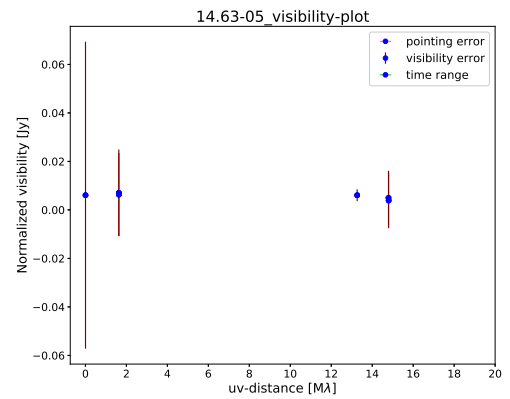
[11] 121.28+0.65のvisibility-plot



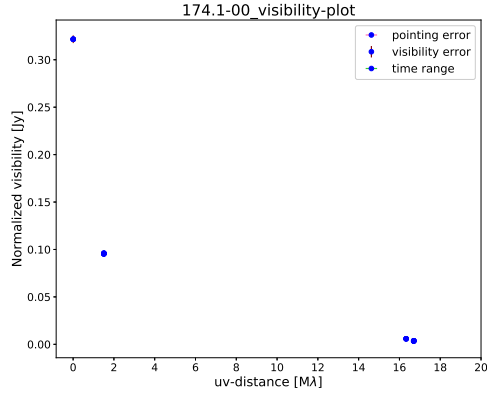
[12] 123.05-6.31のvisibility-plot



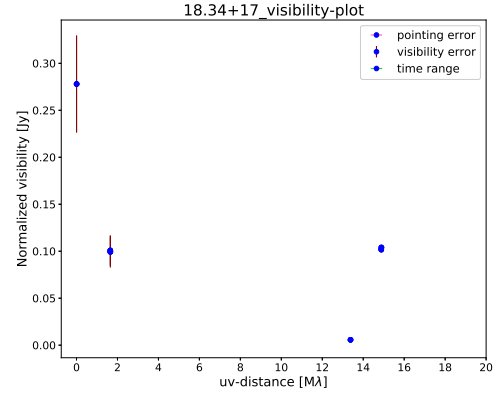
[13] 13.657-0.599のvisibility-plot



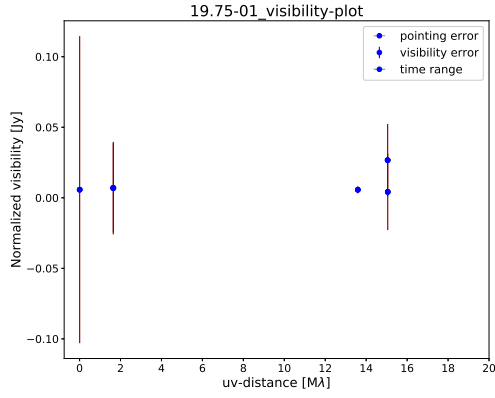
[14] 14.631-0.577のvisibility-plot



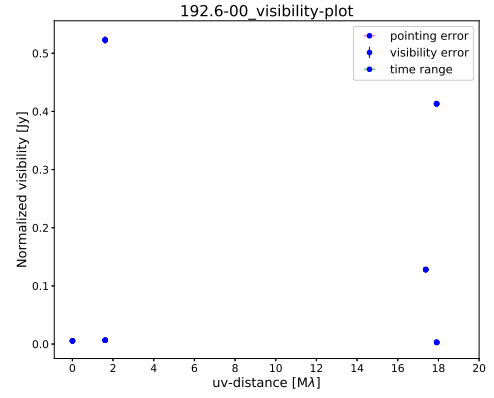
[15]174.19-0.09のvisibility-plot



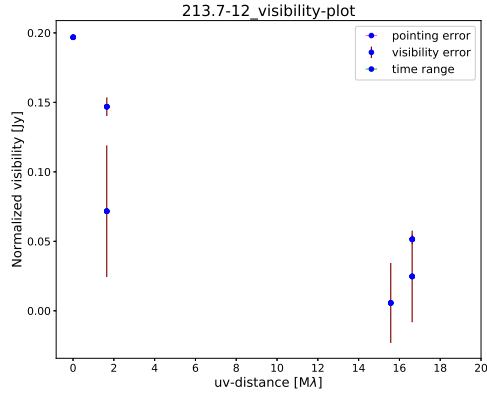
[16]18.34+1.768のvisibility-plot



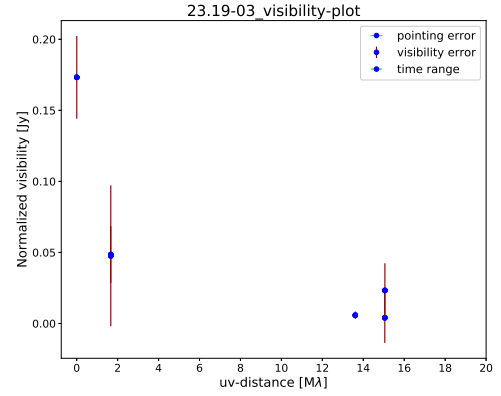
[17]19.755-0.128のvisibility-plot



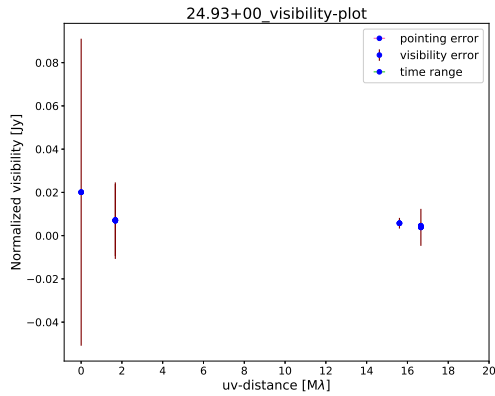
[18]192.60-0.05のvisibility-plot



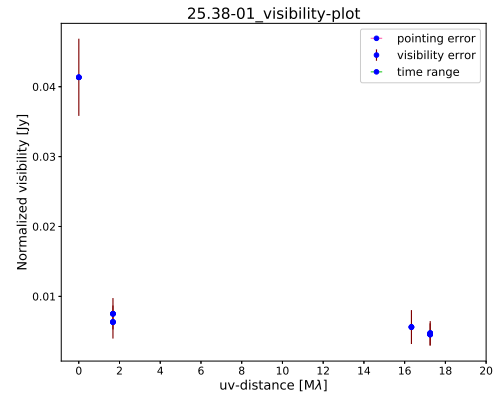
[19]213.70-12.6のvisibility-plot



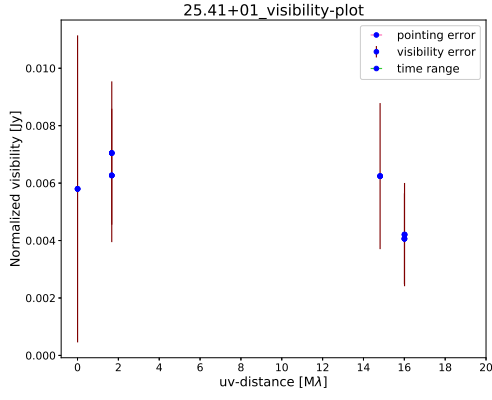
[20]23.19-0.38のvisibility-plot



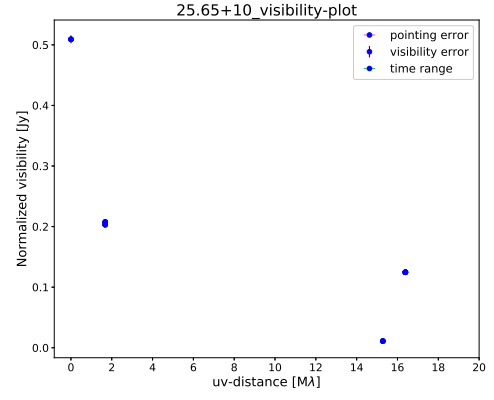
[21]24.93+0.08のvisibility-plot



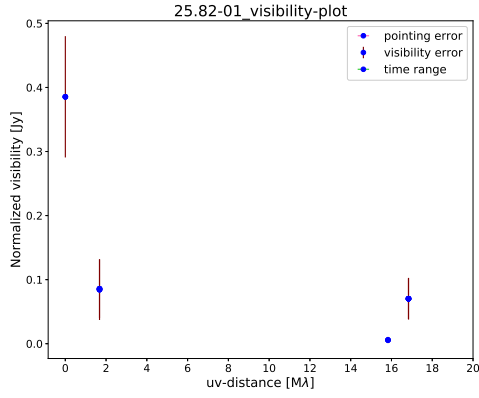
[22]25.38-0.18のvisibility-plot



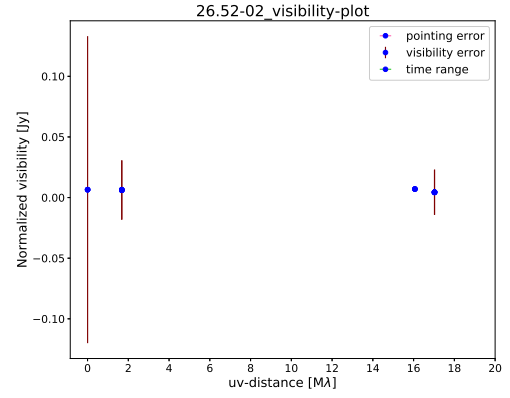
[23]25.41+0.10のvisibility-plot



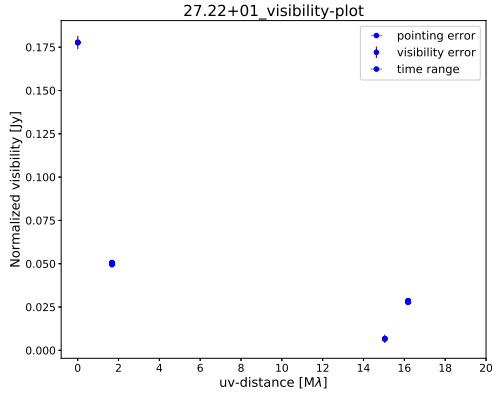
[24]25.65+1.04のvisibility-plot



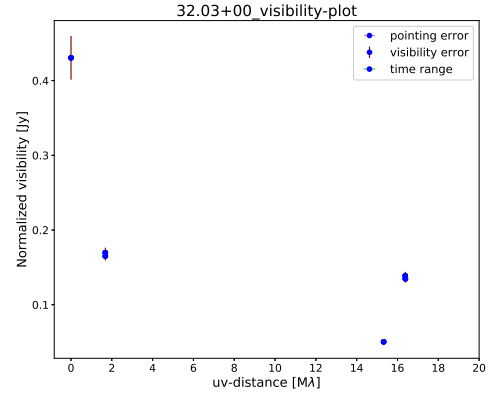
[25]25.82-0.17のvisibility-plot



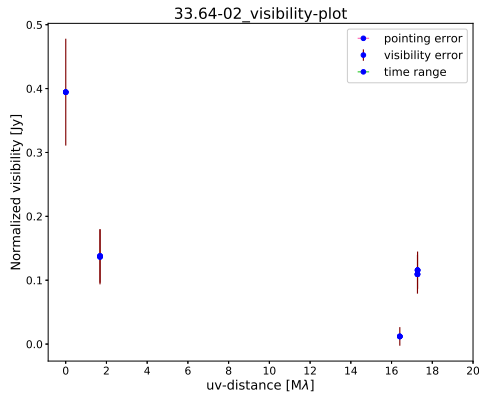
[26]26.52-0.26のvisibility-plot



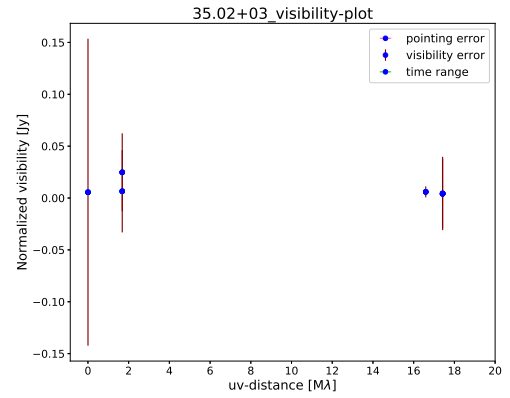
[27]27.22+0.13のvisibility-plot



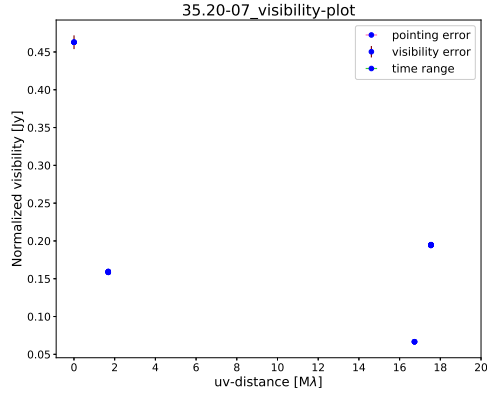
[28]32.03+0.06のvisibility-plot



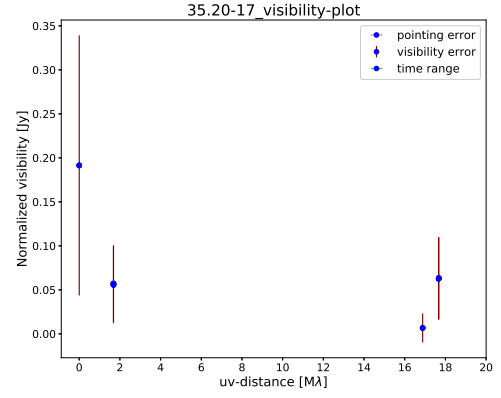
[29]33.64-0.21のvisibility-plot



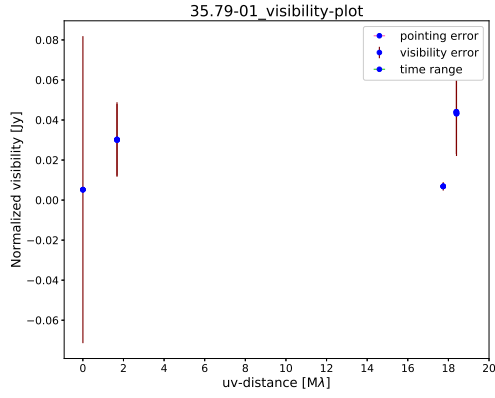
[30]35.02+0.35のvisibility-plot



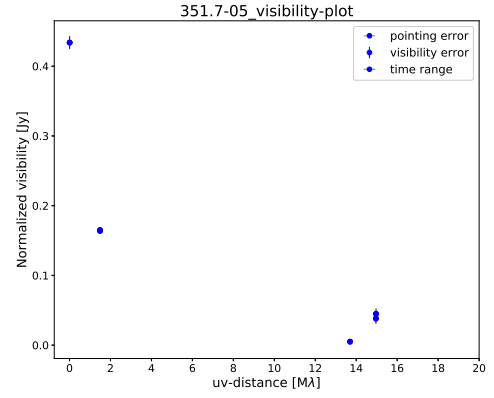
[31]35.20-0.74のvisibility-plot



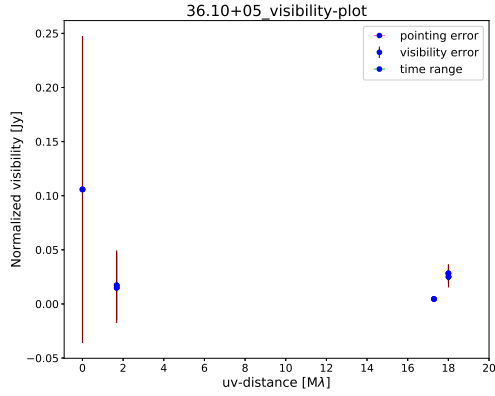
[32]35.20-1.74のvisibility-plot



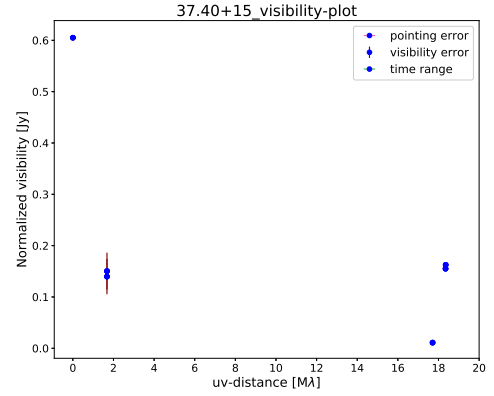
[33]35.79-0.17のvisibility-plot



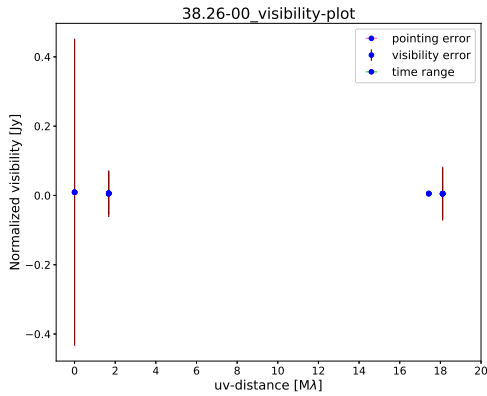
[34]351.775-0.536のvisibility-plot



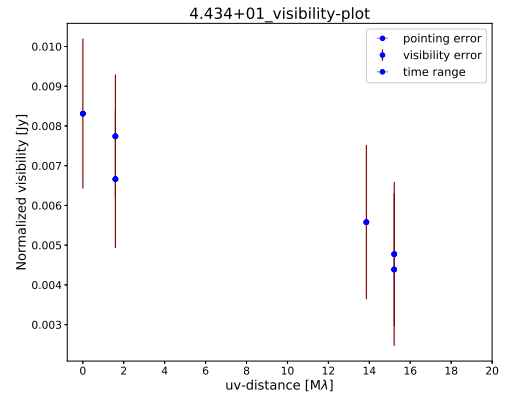
[35]36.10+0.56のvisibility-plot



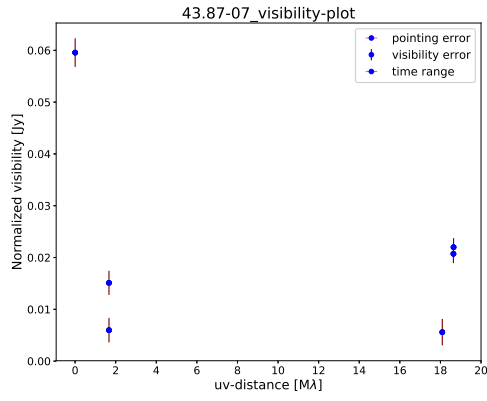
[36]37.40+1.52のvisibility-plot



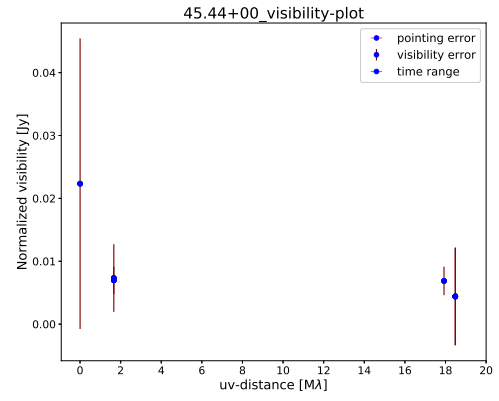
[37]38.26-0.08のvisibility-plot



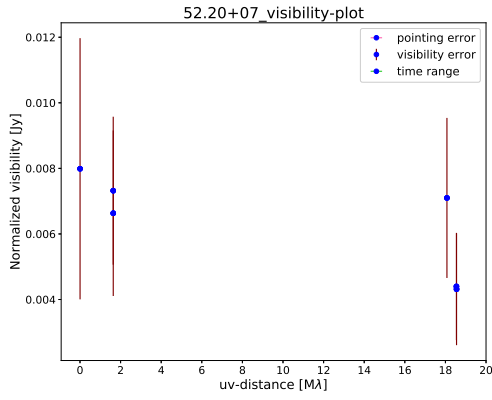
[38]4.434+0.129のvisibility-plot



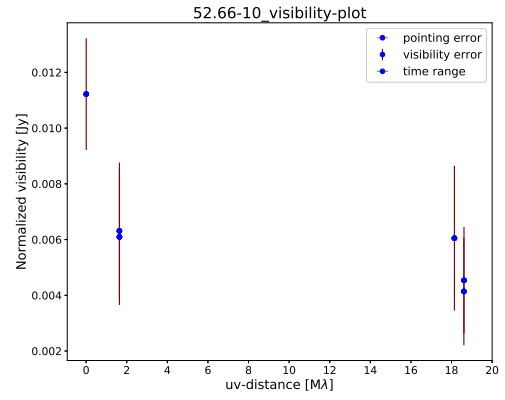
[39]43.87-0.77のvisibility-plot



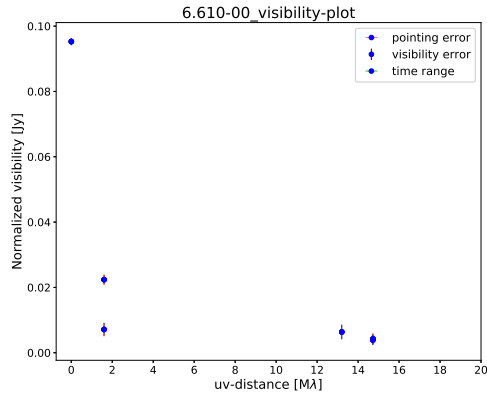
[40]45.44+0.07のvisibility-plot



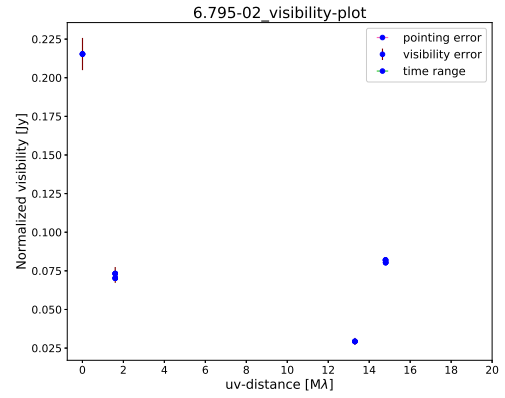
[41]52.20+0.7のvisibility-plot



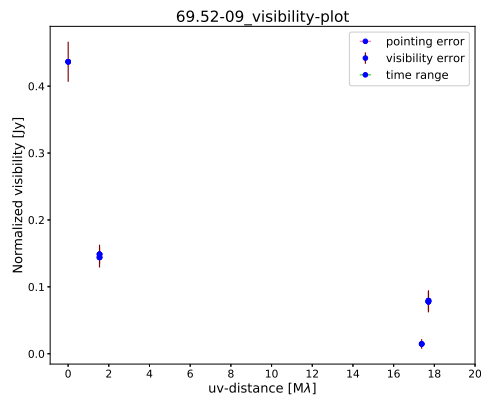
[42]52.66-1.09のvisibility-plot



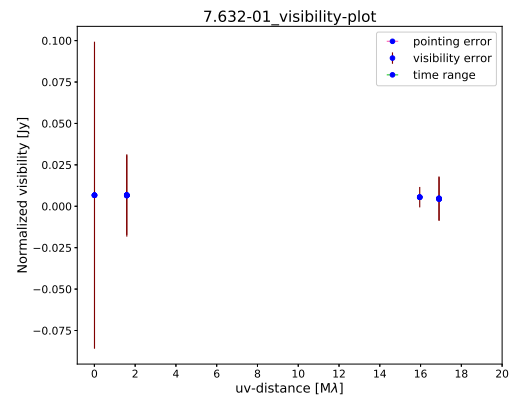
[43]06.610-0.082のvisibility-plot



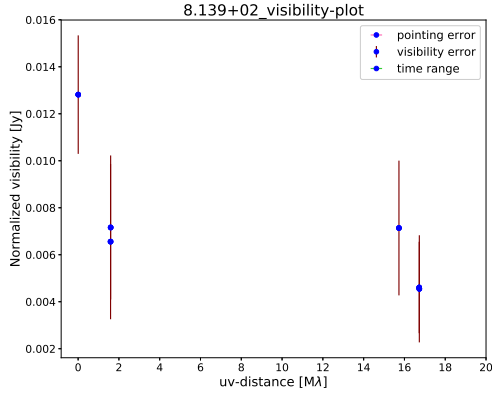
[44]06.795-0.257のvisibility-plot



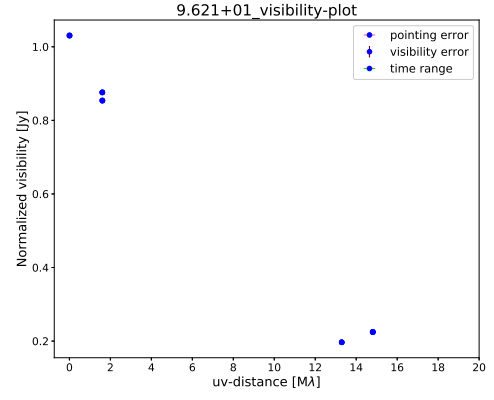
[45]69.52-0.97のvisibility-plot



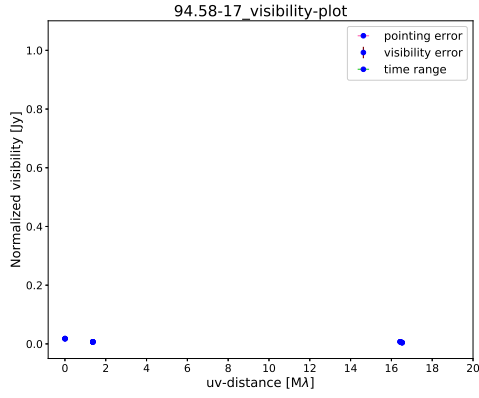
[46]07.632-0.109のvisibility-plot



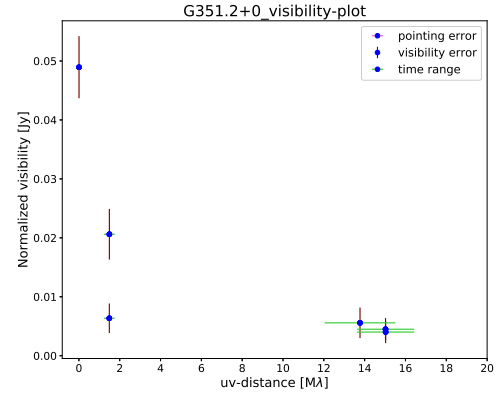
[47]08.139+0.226のvisibility-plot



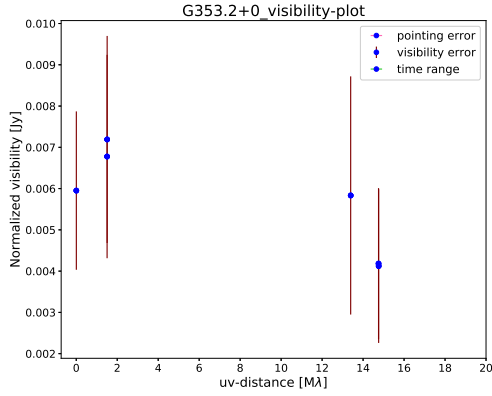
[48]09.621+0.196のvisibility-plot



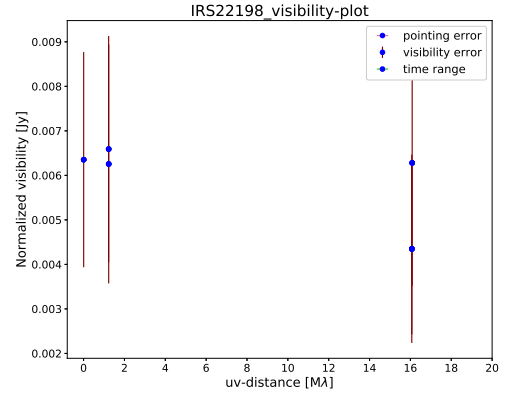
[49]94.58-1.79のvisibility-plot



[50]G351.2+0.のvisibility-plot



[51]G353.2+0.のvisibility-plot



[52]IRS22198のvisibility-plot

図E.1 観測天体のvisibility-plot

付録F

相互相関関数のキャリブレーション

Visibility-plotにおける天体の強度は以下の式で表される。本研究では相互相関関数のキャリブレーションは以下の式で行っている。

$$\text{visibility} = \alpha [\text{Jy}] \times \text{corflux}_{\text{cal}} \quad (\text{F.1})$$

$\alpha [\text{Jy}]$ は単一鏡観測で得られた天体のtotal fluxであり $\text{corflux}_{\text{cal}}$ は局1と局2の自己相関でキャリブレーションした相関係数である。一方で $\text{corflux}_{\text{cal}}$ は式(5.4)のように記述できる。

$$\text{corflux}_{\text{cal}} = \frac{\text{corflux}_{12}}{\sqrt{\frac{\text{autoflux}_{1\text{cal}} \times \text{平均値}_1}{\text{bandpass}_1} \times \frac{\text{autoflux}_{2\text{cal}} \times \text{平均値}_2}{\text{bandpass}_2}}} \quad (\text{F.2})$$

式(F.1)(F.2)を用いると以下のようにかける。

$$\text{visibility} = \alpha [\text{Jy}] \times \frac{\text{corflux}_{12}}{\sqrt{\frac{\text{autoflux}_{1\text{cal}} \times \text{平均値}_1}{\text{bandpass}_1} \times \frac{\text{autoflux}_{2\text{cal}} \times \text{平均値}_2}{\text{bandpass}_2}}} \quad (\text{F.3})$$

ここで式(F.3)を分解する。

$$\text{visibility} = \alpha [\text{Jy}] \times \frac{\text{corflux}_{12}}{\sqrt{\frac{\text{autoflux}_{1\text{cal}}}{\text{bandpass}_1} \times \frac{\text{autoflux}_{2\text{cal}}}{\text{bandpass}_2}}} \times \frac{1}{\sqrt{\text{平均値}_1 \times \text{平均値}_2}} \quad (\text{F.4})$$

ここで式(F.4)の右辺第二項を以下のように定義する。

$$\text{corflux}_J = \frac{\text{corflux}_{12}}{\sqrt{\frac{\text{autoflux}_{1\text{cal}}}{\text{bandpass}_1} \times \frac{\text{autoflux}_{2\text{cal}}}{\text{bandpass}_2}}} [\text{Jy}] \quad (\text{F.5})$$

(F.5)を用いて(F.4)を書き直す。

$$\text{visibility} = \alpha' [\text{no dimension}] \times \text{corflux}_J [\text{Jy}] \quad (\text{F.6})$$

α' を以下のように定義した。

$$\alpha' = \alpha [\text{Jy}] \times \frac{1}{\sqrt{\text{平均値}_1 \times \text{平均値}_2}} [\text{Jy}] \quad (\text{F.7})$$

本研究のvisibility-plotに使用しているのは式(F.6)の corflux_J であり、powerの次元を持つ量となっていることに注意する必要がある。