

銀河系ペルセウス座腕を対象とした 6.7GHz メタノールメーザー探査

電波天文観測研究室

11s2024s 柴田 裕輝

(指導教員 百瀬 宗武 米倉 覚則)

2015 年 3 月 30 日

abstract

現在、VERA(VLBI Exploration of Radio Astronomy) や VLBA(Very Long Baseline Array) を中心として位置天文学 (アストロメトリ観測) による天の川銀河の 3 次元地図を作成するプロジェクトが盛んに行われている。アストロメトリ観測とは年周視差の考え方を応用した測距法である。メーザー源の年周視差は $<1\text{mas}$ (ミリ秒角) と非常に小さいため、高い空間分解能が得られる VLBI(超長基線干渉計: Very Long Baseline Interferometry) の手法が用いられている。高い輝度温度を持ち放射サイズがコンパクトな水メーザー源を対象に VERA によるアストロメトリ観測行われ、天の川銀河の地図を作成してきた。Honma et al. (2012) や Reid et al. (2014) などがその例である。

ところが水メーザー以外にも多数のメーザーが発見されている近年、アストロメトリ観測の対象として、観測上の利点が多い 6.7GHz メタノールメーザーが注目されている。

これまでのアストロメトリ観測は主に水メーザーのカatalogの中から輝度の大きな天体を優先的に選出し、実施されてきた。そのためペルセウス座腕では、銀河系第 1 象限でわずか 2 天体しか観測が行われていない空白領域があった。

本研究では日立 32m 電波望遠鏡で、空白領域における 6.7GHz クラス II メタノールメーザーの観測を行い、銀河系 3 次元地図の作成に重要な役割を果たすメーザー源の発見を試みた。その結果、46 の観測スポット中新たに 2 天体からのメタノールメーザーの放射が見られた。比較的強い放射を放射をした G084.951-00.692 に対して、VERA を用いたアストロメトリ観測の可否を考察したところ、困難であるとの結論が得られた。

目次

1	序論	3
1.1	メーザー現象	3
1.2	代表的なメーザー	3
1.3	研究目的	4
2	観測	6
2.1	観測天体の選定	6
2.2	観測のスケジュール作成と実行	8
2.3	観測パラメータ	8
2.4	解析方法	8
3	結果	10
3.1	検出天体	10
3.2	検出スペクトル	10
4	考察 I メーザー源の検出	14
4.1	既知天体からの混入	14
4.2	新検出天体	20
5	考察 II VERA を用いた今後のアストロメトリ観測の評価	22
5.1	kinematic distance 法による新検出天体 G084.951-00.692 の概算距離の導出	22
5.2	新検出天体 G084.951-00.692 の年周視差の算出	23
5.3	VERA の角度分解能の算出	24
5.4	VERA によるアストロメトリ観測の評価	24
6	まとめ	27

1 序論

1.1 メーザー現象

通常の輝線スペクトルは、分子との衝突によって励起された分子・原子・イオン (粒子数 n_2 、統計的重み g_2) が下のエネルギー準位 (粒子数 n_1 、統計的重み g_1) に自発的に遷移する際に電波を放出することで生じ、非常に微弱である。

$$\frac{n_2/g_2}{n_1/g_1} = \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right) \quad (1)$$

また上記のボルツマン分布に従って、高いエネルギー準位の粒子の存在確率分布は、低いエネルギー準位の粒子の存在確率分布よりも小さく ($n_2/g_2 < n_1/g_1$) になっている。

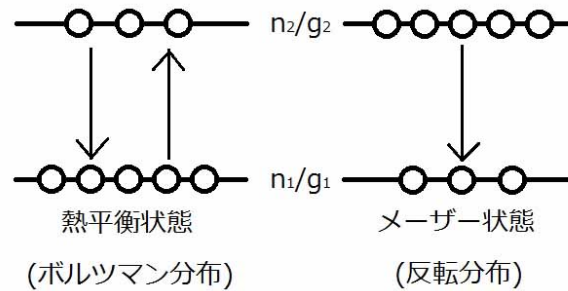


図1 ボルツマン分布と反転分布

ところが粒子数密度の小さい宇宙空間では、外部からの強い放射による放射励起や分子同士の衝突励起によって、低い準位よりも高い準位の粒子の存在確率分布が相対的に大きくなる ($n_2/g_2 > n_1/g_1$) 反転分布を形成することがある。反転分布は不安定な状態で、何らかの作用で粒子が高い順位から低い順位へ遷移すると、それを契機として連鎖的に他の粒子も遷移を起こす。これを誘導放射といい、放射された電波はメーザー (MASER: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) と呼ばれる強い輝線になる。メーザー放射は以下のような特徴を持つ。

- (i) 強度が局所熱平衡状態 (LTE) に比べて大きい。
- (ii) 電波源の広がり (メーザースポット) が極めて小さく点状である。
- (iii) 直線または円偏光している。
- (iv) 線幅は熱運動による幅より小さい場合が多い。
- (v) 位相がそろっている。

1.2 代表的なメーザー

メーザーは1960年代から観測が継続され、現在までに OH, H₂O, CH₃OH, SiO, H₂CO などの多様なメーザーが発見されてきた。メーザーは星形成領域から晩期型星まで様々な進化段階で付随が見られる。

1.2.1 水メーザー

水メーザーは大質量星形成領域中で多く検出され、若い星からのジェットで励起されたショック領域またはアウトフローと分子雲の境界で発生すると考えられている。アウトフローやジェットの通過によりメーザーの速度成分の出現・消滅が激しい。また強い放射をすることが知られており、VLBI 観測の対象となることが多かった。水メーザーは活動的銀河の中心核でも観測することができ、メーザー源の位置と視線速度から中心核に存在すると考えられている巨大ブラックホールの質量を推定することができる。

1.2.2 メタノールメーザー

メタノール分子は様々な周波数における遷移が発見されてきた。メタノールメーザーは付随領域の違いによってクラス I とクラス II に分類されるが、共に生まれて間もない大質量星に付随する (Batra et al. 1987; Menten 1991; Cyganowski et al. 2009)。各クラスに属するメタノールメーザーの周波数を表 1 に示す。

表 1 メタノール分子の遷移周波数

クラス	周波数[GHz]
クラスI	9.9, 25.0, 25.8, 26.8, 27.4, 28.1, 29.6, 30.3, 36.1, 44.1, 84.5, 95.2, 104.3, 132.9, 146.6, 229.8
クラスII	6.7, 12.2, 20.0, 23.1, 29.0, 37.7, 38.2, 38.4, 86.6, 86.9, 107.0, 108.8, 156.6, 156.8, 157.2

クラス I メタノールメーザーは、中心星からのアウトフローと周囲に広がる分子雲の衝突励起によって発生するとされる。放射スポットのサイズが大きく、VLBI 観測のように高分解能の観測では分解されてしまう特徴を持つ。一方、クラス II メタノールメーザーは赤外線源や Ultra Compact HII 領域 (UCHII 領域) に付随することが多く、赤外線の放射励起によって発生するとされる。クラス II メタノールメーザーは放射スポットのサイズが小さく水メーザーに次いで高い輝度温度を持つため、VLBI 観測のような高分解能の観測対象として近年注目されている。またクラス II メタノールメーザーは OH メーザーの近傍で放射されることがわかっている (Menten 1991)。実際に VLBI 観測によって、クラス II メタノールメーザーは中心星を取り巻く降着円盤に付随するという説が有力となっている。

表 2 クラス I・クラス II メタノールメーザーの特徴

	クラスI	クラスII
赤外線、OHメーザー	付随しない	付随する
発生領域	アウトフローと分子雲の境界	降着円盤上
励起メカニズム	衝突励起	放射励起
メーザースポットのサイズ	数百AU	数AU
典型的な輝度温度	10^6 - 10^8 K	$> 10^{10}$ K

太陽と地球の平均距離を 1AU(天文単位) とし、 1.5×10^{11} m である。

Menten (1991) では 1 つの天体においてクラス I・II の両者が放射されることはないと述べられているものの、Ellingsen et al. (2005) では両者は相互に作用を及ぼす可能性もあると述べられている。そして Cyganowski et al. (2009) では、クラス II メタノールメーザーの放射が見られた EGOs(Extended Green Objects) 天体の 89% にクラス I メタノールメーザーの放射が見られるという結果が記されている。クラス I・II の分類は定性的なものであり、実際の現象を解釈するにあたっては注意が必要である。

1.3 研究目的

現在、VERA(VLBI Exploration of Radio Astronomy) や VLBA(Very Long Baseline Array) を中心として位置天文学 (アストロメトリ観測) による天の川銀河の 3 次元地図を作成するプロジェクトが盛んに行われている。これまでのアストロメトリ観測は主に水メーザーのカタログ (Arcetri カタログ (1013 天体); Valdetaro et al. 2001; Sunada et al. 2007 (222 天体)) の中から輝度の大きな天体を優先的に選出し、実施されてきた。

ところが水メーザー以外にも多数のメーザーが発見されている近年、アストロメトリ観測の対象として 6.7GHz メタノールメーザーが注目されている。6.7GHz メタノールメーザーは水メーザーに比べて数年以上に亘って安定な放射を起こし (Goedhart et al. 2004)、空間分布上においても各メーザースポットが安定して

存在することがわかってきている。年周視差計測では1年間に亘って複数回観測を実施する必要があるため、変動の少ないメタノールメーザーはアストロメトリ観測に適していると思われる。また6.7GHzメタノールメーザーは低周波数帯の放射のため、大気による位相変動の影響を受けにくく、水メーザーに次いで高い輝度温度を持つという観測面での利点もある。

議論されている6.7GHzメタノールメーザー源を用いたアストロメトリ観測だが、実際に観測が実施されている。具体的な例として、Rygl et al. (2010) では European VLBI Network (EVN) を用いてメーザー源5天体の距離の測定が行われたほか、Matsumoto et al. (2011) では Japanese VLBI Network (JVN) を用いて IRAS02232+6138 (W3(OH)) の年周視差及び内部固有運動の観測に成功している。

水メーザー源を対象に行われてきたアストロメトリ観測の結果である図2を見ると、太陽から最近傍のメインアームとして知られているペルセウス座腕では、銀河系第1象限でわずか2天体しか観測が行われていないことがわかる。

本研究では日立32m電波望遠鏡で、銀経 $49^\circ < l < 86^\circ$ の領域における6.7GHzクラスIIメタノールメーザーの観測を行い、銀河系3次元地図の作成に重要な役割を果たすメーザー源の検出を行うことと、メーザー源までのおおよその距離を算出することで、VERAを用いた今後のアストロメトリ観測の展望を評価することを目的としている。

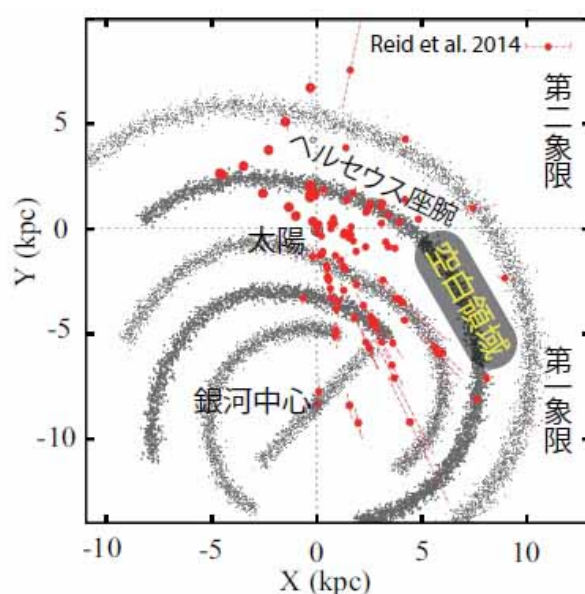


図2 VERA・VLBA・EVN(European VLBI Network)による103天体の位置天文観測結果(Reid et al. 2014)を銀河系の想像図(Taylor& Cordes 1993 with updates)に重ねている(坂井伸行氏 PAG project を引用)。太陽を中心に銀経 $0^\circ < l < 90^\circ$ を第1象限、銀経 $90^\circ < l < 180^\circ$ を第2象限としている。

2 観測

2.1 観測天体の選定

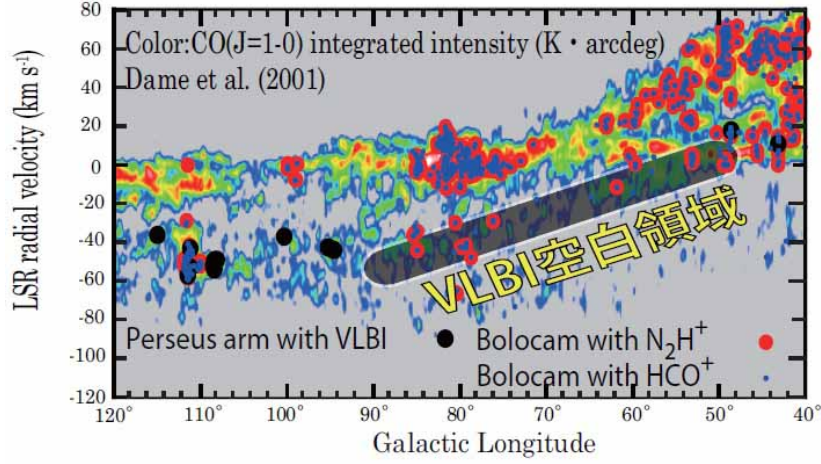


図3 ペルセウス座腕の空白領域 (坂井伸行氏 PAG project を引用)。

距離を測定することなく銀河系の構造を議論する際は、分子輝線の位置 (銀経 l)-速度 (V_{LSR}) 図が使用される。前述した2つの水メーザーカタログと Dame et al. (2001) の位置-速度図を比較したところ、ペルセウス座腕の空白領域に位置するメーザー源が 15/1235 天体見つかった。しかしこの 15 天体には銀経 $l < 60^\circ$ の天体が含まれていなかったため、観測を実施してメーザー天体を見つける必要がある。

近年、Rosolowsky et al. (2010) が星形成領域 8358 天体のカタログを Bolocam Galactic Plane Survey (BGPS) として発表した。このカタログは高密度ガストレーサーの N_2H^+ 及び HCO^+ の分子輝線の強度を記載したものであるが、星形成の母体となる分子雲コアもトレースしていると考えられている。また、22GHz 水メーザーが検出されるフェーズとよく合っていることが報告されている。

高密度ガストレーサーである N_2H^+ 及び HCO^+ 分子輝線の観測結果を踏まえたところ (Shirley et al. 2013)、BGPS データベースからは 46/6194 天体がペルセウス座腕の空白領域と一致した。このうち銀経 $l < 60^\circ$ を満たす天体は 20 天体であった。本研究では BGPS データベースからの 46 天体がペルセウス座腕の空白領域のサンプルとなる。以下に観測天体と位置座標を示す。

表 3: 観測天体リスト

BGPS 天体名 銀経 l -銀緯 b	Right Ascension (J2000)				Declination (J2000)				分子輝線速度 [km/s]	
	h	m	s	arcmin	d	m	s	arcmin	HCO^+	N_2H^+
G49.264+00.312	19	20	44.6	17411.2	14	38	25.9	878.4	3.3	3.1
G49.829+00.370	19	21	37.9	17424.5	15	10	2.6	910.0	5	0.096
G49.911+00.370	19	21	47.5	17426.9	15	14	23.1	914.4	8.3	0.107
G50.271-00.442	19	25	27.5	17481.9	15	10	18	910.3	15.9	0.068
G50.283-00.390	19	25	17.8	17479.5	15	12	24.1	912.4	16	16.7
G52.752+00.336	19	27	31.9	17513.0	17	43	27	1063.5	15.1	0.085
G53.032+00.088	19	29	0.5	17535.1	17	51	5.8	1071.1	3.6	0.06
G53.036+00.112	19	28	55.7	17533.9	17	51	59.8	1072.0	5.2	5.2
G53.091+00.118	19	29	1.1	17535.3	17	55	7.2	1075.1	2	2.3
G53.136+00.028	19	29	26.3	17541.6	17	54	51	1074.9	0.088	1.6

表 3: 観測天体リスト

BGPS 天体名	Right Ascension (J2000)				Declination (J2000)				分子輝線速度 [km/s]	
銀経 l -銀緯 b	h	m	s	arcmin	d	m	s	arcmin	HCO ⁺	N ₂ H ⁺
G53.155+00.210	19	28	48.5	17532.1	18	1	8	1081.1	2.6	2.6
G53.176+00.184	19	28	56.6	17534.2	18	1	26.4	1081.4	5.6	5.5
G53.186+00.208	19	28	52.5	17533.1	18	2	39.4	1082.7	1.5	2.1
G53.189+00.158	19	29	4.1	17536.0	18	1	25.9	1081.4	5.6	5.6
G53.201+00.124	19	29	13.1	17538.3	18	1	5.2	1081.1	4.7	0.07
G57.548-00.272	19	39	38.6	17694.7	21	37	29.9	1297.5	4.3	0.109
G57.776+00.295	19	38	0.8	17670.2	22	6	11.8	1326.2	-3.2	0.06
G59.683+00.125	19	42	44.6	17741.2	23	40	39.9	1420.7	0.5	0.9
G59.695+00.187	19	42	32	17738.0	23	43	8.3	1423.1	0.5	0.8
G59.707+00.187	19	42	33.6	17738.4	23	43	45.8	1423.8	-1.1	0.052
G59.999+00.117	19	43	27.2	17751.8	23	56	53.5	1436.9	-14.4	0.141
G60.320+00.187	19	43	53.9	17758.5	24	15	42.8	1455.7	3.7	5.5
G60.573-00.187	19	45	52.6	17788.2	24	17	40.5	1457.7	4.9	0.107
G61.831-00.274	19	48	59.8	17835.0	25	20	8.3	1520.1	-11.6	-11.5
G64.814+00.173	19	54	6.5	17911.6	28	7	43.8	1687.7	-16.2	0.07
G71.149+00.402	20	8	49.5	18132.4	33	37	34.6	2017.6	-17.9	0.058
G76.156-00.287	20	25	24.8	18381.2	37	23	25.1	2243.4	-28.6	-28.9
G76.168-00.315	20	25	33.9	18383.5	37	23	0.9	2243.0	-29.2	0.071
G78.233+00.019	20	30	19.2	18454.8	39	15	16.1	2355.3	-34.5	0.088
G78.704+01.243	20	26	35.1	18398.8	40	21	9.8	2421.2	-47.6	-47.6
G79.289+01.301	20	28	7.5	18421.9	40	51	41	2451.7	-40.3	0.072
G79.308+01.307	20	28	9	18422.3	40	52	58.5	2453.0	-41.2	-41.6
G79.329+01.289	20	28	18	18424.5	40	53	12.7	2453.2	-42.8	0.07
G79.347+01.363	20	28	2.3	18420.6	40	56	40.8	2456.7	-42	0.063
G79.381+01.325	20	28	18.4	18424.6	40	57	0.3	2457.0	-42.9	0.064
G79.927+00.907	20	31	48.1	18477.0	41	8	45.8	2468.8	-42.4	-42.3
G80.525+00.721	20	34	29	18517.3	41	30	53.4	2490.9	-29.9	-29.8
G80.704+00.718	20	35	4.9	18526.2	41	39	28.4	2499.5	-44.9	0.053
G84.951-00.692	20	55	33.1	18833.3	44	6	10.6	2646.2	-34.6	-34.4
G84.972-00.694	20	55	37.9	18834.5	44	7	0.9	2647.0	-33.8	0.118
G84.984-00.532	20	54	59.1	18824.8	44	13	50.7	2653.8	-44	-44
G85.236+00.022	20	53	31.4	18802.9	44	46	54.4	2686.9	-35.5	-35.2
G85.260+00.008	20	53	39.9	18805.0	44	47	22.6	2687.4	-31.6	0.071
G85.266+00.020	20	53	38.1	18804.5	44	48	6.9	2688.1	-31.4	0.078
G85.378+00.022	20	54	1.9	18810.5	44	53	20.4	2693.3	-36.2	0.075
G85.412+00.002	20	54	13.6	18813.4	44	54	10.1	2694.2	-36.6	-36.1

2.2 観測のスケジュール作成と実行

観測のスケジュールファイルを作成するために、観測天体名と座標が記載されたリストである”source.sch”を使用した。スケジュール作成ソフト”pc-sched.exe”を用いて観測スケジュールファイルの DRG ファイルを作成した。on-off 法による観測を行うため、同じ天体を 2 回観測を行うように設定し前者を on 点 (観測天体にアンテナを向ける)、後者を off 点 (観測天体のない空へアンテナを向ける) とした。on 点と off 点ではアンテナが異なる方向を向くため、移動時間を考慮して 30 秒の間隔を設けた。

DRG ファイルの作成後、”drgconv-ibaraki.exe”を用いて a.skd ファイルと o.skd ファイルに変換を行った。a.skd ファイルはアンテナ制御、o.skd ファイルはデータ取得の役割がある。o.skd ファイルの生成後に off 点観測のオフセットとして赤経方向に +60arcmin を加えた。

スケジュールファイルの実行は茨城大学内の PC から遠隔操作で実施した。

2.3 観測パラメータ

日立 32m 電波望遠鏡を用いて、2014 年 12 月 27 日と 2015 年 1 月 20 日の 2 日間で観測を行った。観測パラメータを表 4 に示す。

表 4 日立局観測パラメータ

観測日	2014/12/27, 2015/01/20
望遠鏡	日立32m電波望遠鏡
ビームサイズ	～5分角
開口能率	～70%
観測周波数	6664-6672MHz
分光点数	8192点
積分時間	300秒/天体
速度分解能	0.044km/s
rmsノイズレベル(1 σ)	～0.3Jy

2.4 解析方法

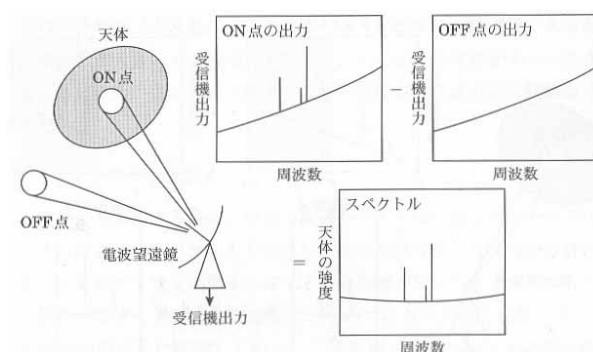


図 4 on-off 法とベースラインフィッティング.

観測が終了すると約半日かけて自動で FFT 変換により、生データ (自己相関関数) からスペクトルの生成と、on 点のデータを off 点で減算するベースラインフィッティング補正を行った。これによって大気雑音の補正が行われるほか、天体の放射がない周波数領域を平坦にする効果が得られる。ベースラインフィッティングの終了後、smooth_rep.sh ファイルを実行し、観測データの S/N 比 (Signal to Noise ratio) の向上を図った。smooth_rep.sh は速度成分を 3ch ずつ移動平均するプログラムで、この実行によって S/N 比 $\sqrt{3}$ 倍の向上が期待できる。

観測によって得られたスペクトルにピークが見られる場合は、ピーク速度の $\pm 10[\text{km/s}]$ の範囲内で標準偏差を計算することでノイズレベルを求めた。ピーク強度値とノイズレベルの除算を行い、得られた値が 5σ 以上の場合はメーザー検出とみなし、 $3\sim 5\sigma$ の場合はマージナルディテクション (疑わしい検出) として取り扱った。また過去に観測が行われている天体のスペクトルが記載されている論文 (Xu et al. 2009; Pandian et al. 2007; Pestalozzi et al. 2005; master catalog) と今回の観測天体の位置比較を行い、既知天体の放射からの混入確認と放射源の同定を行った。

スペクトルを検出した領域で過去に観測例が見られない天体は 9 点法という追観測を実施した。9 点法とは観測天体を中心に赤経赤緯方向に日立アンテナのビームサイズの半値半幅ずつオフセットを入れた 9 点の観測を行い、観測天体の位置情報を得る測定法である。これによって BGPS ダストコア中にメーザー源が存在することを確認した。またマージナルなスペクトル及びマージナルで新検出と思われるスペクトルは、5 分間にわたる積分を 1 スキャンとし、複数回スキャンを行うことで感度を向上させ、メーザー放射の有無の確認を行った。

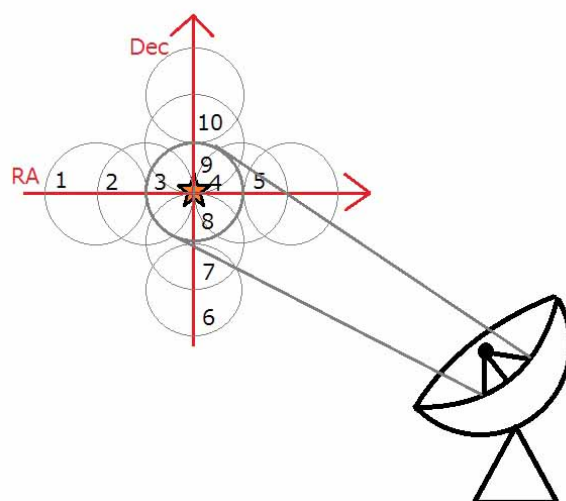


図 5 9 点法の概略図. RA、Dec 方向にそれぞれアンテナビームの半値半幅ずつオフセットを加え、on-off 点合計 20 スキャンの観測を行う。

3 結果

3.1 検出天体

観測の結果、全 46 天体のうち既知の 5 天体、新検出とみられる 2 天体からメタノールメーザー放射が検出された。BGPS 天体 G085.236+00.022 については 5 分間積分を 2 スキャン実施したが、マージナルな検出であった。したがって検出率は 15.2% となった。既知天体からサイドローブを介して混入したものも含め、15 のスペクトルが観測された。検出された 15 天体のピーク強度及びピーク速度は以下の表の通りである。

表 5: 検出天体

BGPS 天体名	ピーク速度 [km/s]	ピーク強度 [Jy]	速度範囲 [km/s]	rms ノイズ [Jy]	備考
G049.264+00.312	-5.1	8.95	-7~8	0.25	
G053.032+00.088	10.1	1.51	9~11	0.29	
G053.036+00.112	10.0	1.66	9~11	0.27	
G059.683+00.125	27.1	2.63	16~28	0.29	
G059.695+00.187	27.2	1.59	16~28	0.29	
G059.707+00.187	27.2	2.32	16~28	0.28	
G060.573-00.187	3.7	2.45	3~5	0.31	
G084.951-00.692	-35.5	6.40	-37~-35	0.25	
G084.972-00.694	-35.5	5.07	-37~-35	0.27	
G084.984-00.532	-38.3	1.87	-40~-37	0.31	
G085.236+00.022	-29.5	0.82	-30~-28	0.20	マージナル検出
G085.260+00.008	-29.4	2.78	-30~-28	0.33	
G085.266+00.020	-29.5	3.98	-30~-28	0.29	
G085.378+00.022	-29.5	73.07	-32~-28	0.32	
G085.412+00.002	-29.5	110.77	-32~-28	0.30	

3.2 検出スペクトル

3.2.1 5σ 以上の検出天体

5σ 以上で検出された 14 天体のスペクトルを以下に示す。図の縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR(Local Standard of Rest) 視線速度 [km/s] とした。

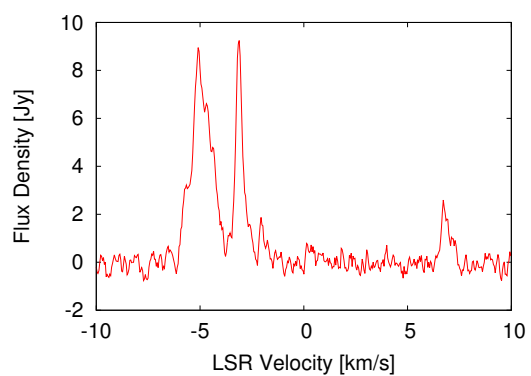


図 6 G049.264+00.312 のスペクトル

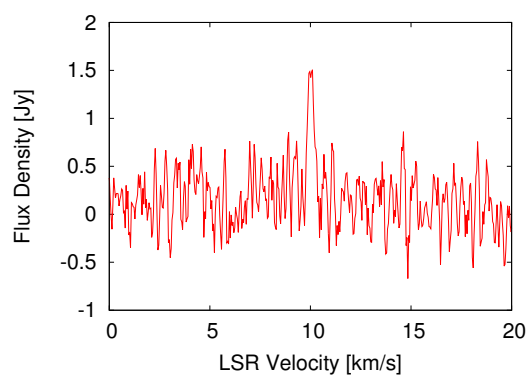


図 7 G053.032+00.088 のスペクトル

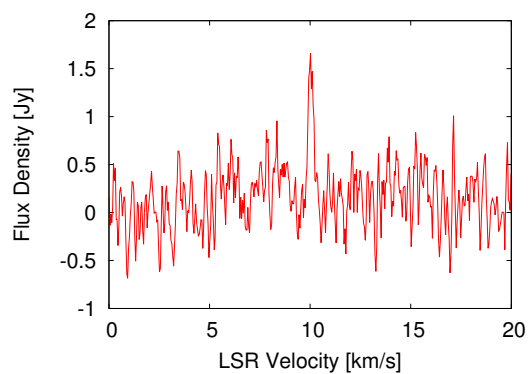


図 8 G053.036+00.112 のスペクトル

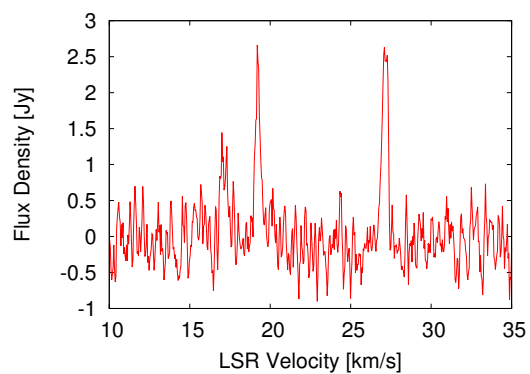


図 9 G059.683+00.125 のスペクトル

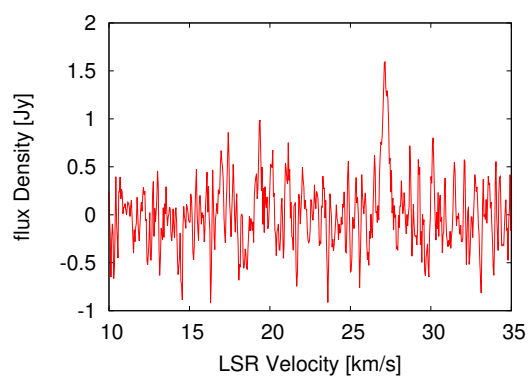


図 10 G059.695+00.187 のスペクトル

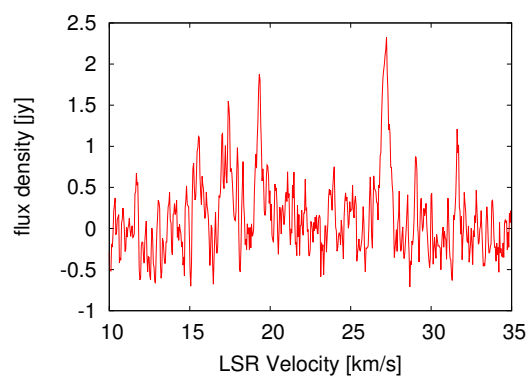


図 11 G059.707+00.187 のスペクトル

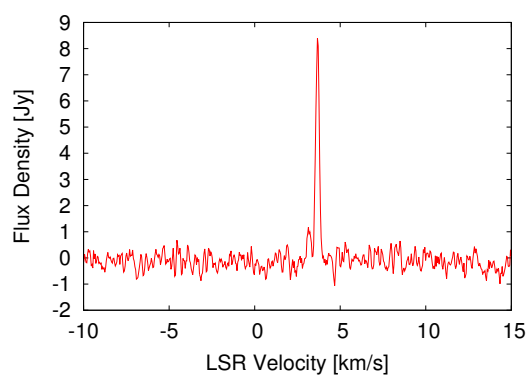


図 12 G060.573-00.187 のスペクトル

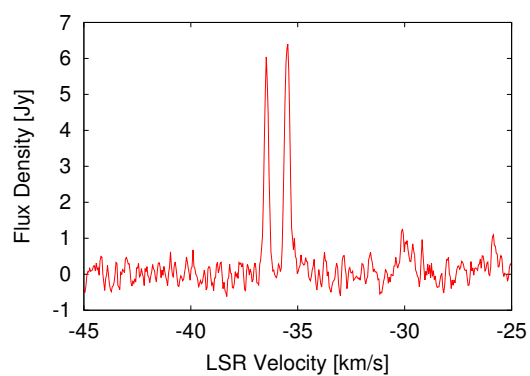


図 13 G084.951-00.692 のスペクトル

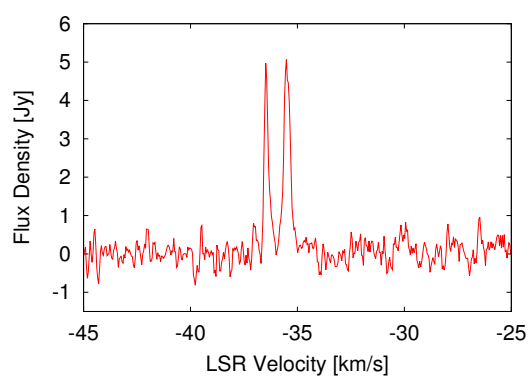


図 14 G084.972-00.694 のスペクトル

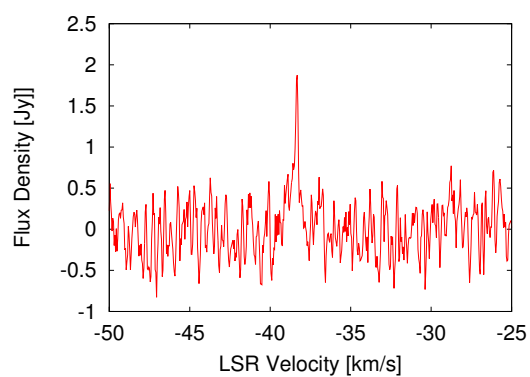


図 15 G084.984-00.532 のスペクトル

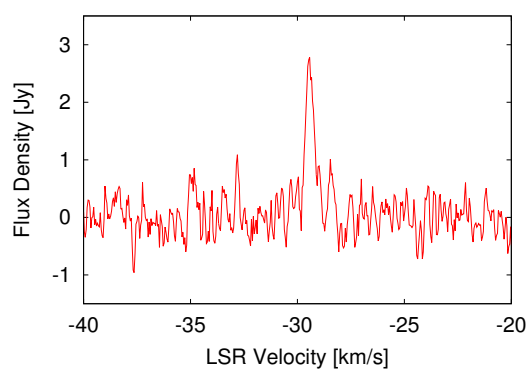


図 16 G085.260+00.008 のスペクトル

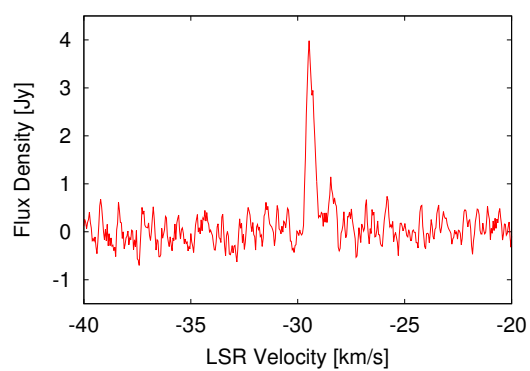


図 17 G085.266+00.020 のスペクトル

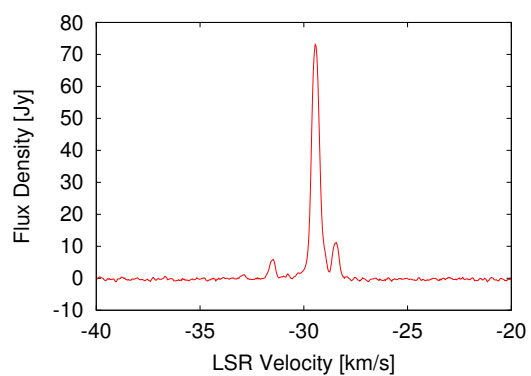


図 18 G085.378+00.022 のスペクトル

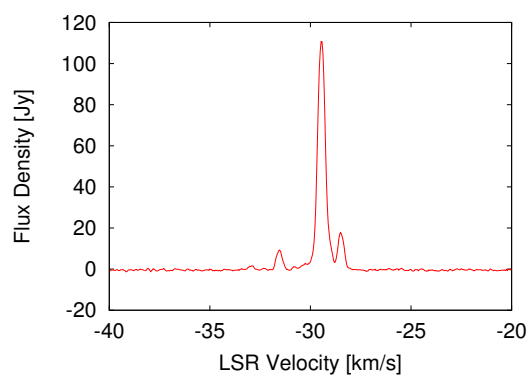


図 19 G085.412+00.002 のスペクトル

3.2.2 マージナルな検出天体

3 $\sim$ 5 σ のマージナルな検出をしたスペクトルが 1 天体であった。追観測で積分時間 300 秒の積分を 2 スキャン行ったが、スキャン数が足りずに再びマージナルな検出となった。スペクトルを以下に示す。図の縦軸はフラックス密度 [Jy]、横軸は LSR 視線速度 [km/s] とした。

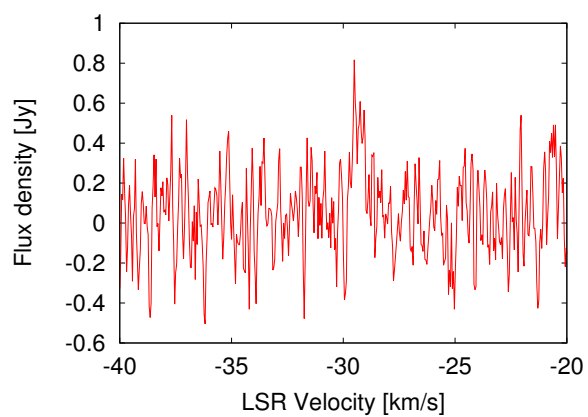


図 20 G085.236+00.022 のスペクトル

4 考察 I メーザー源の検出

4.1 既知天体からの混入

今回の観測で 15 天体のスペクトルが検出されたが、うち 12 天体で既知の 5 天体からの放射の混入があると考えられる。

既知天体からの混入の判断を行う上で、スペクトルの形状及びピーク速度の比較と、日立局のアンテナビームパターンを考慮する必要がある。電波望遠鏡は天体からの離角に依存した強度検出をする。アンテナパターンが半値幅 5arcmin のガウシアンビームであると仮定し、同一天体からの放射を異なる離角で観測した場合、強度は異なるもののスペクトルの形状及びピーク速度成分は一致する。また、これにしたがってサイドローブと呼ばれるアンテナ主ビーム外からの電波も検出してしまいう特性がある。日立局のアンテナビームパターンは過去に測定されている (古川尚子氏 2014, 6.7GHz メタノールメーザー 9.621+01 を用いた日立アンテナビームパターン) ため、今回の観測天体と混入源と思われる天体の位置比較を行い、離角の算出をした上で、検出が期待される強度を見積もった。混入源からの期待される強度と観測強度がおおよそ一致する場合は、その混入源からの放射とみなした。

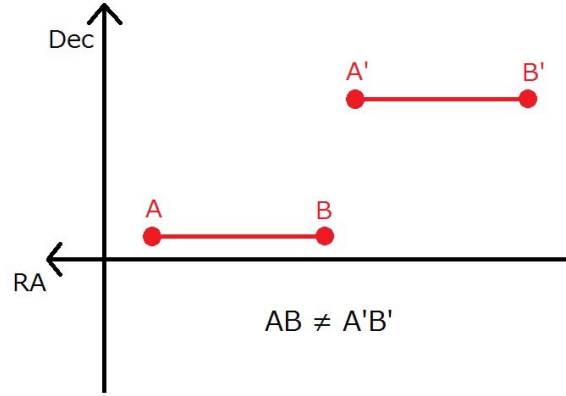


図 21 メルカトル図法による距離の誤差. 高銀緯ほど銀経の長さが伸びて描かれてしまう

天体の位置を赤経 α (Right Ascension)-赤緯 δ (Declination) でマッピングする際はメルカトル図法の手法を用いた。観測天体 (α_1, δ_1) と既知天体 (α_2, δ_2) の離角 l を算出するにあたって、赤緯 (δ_1) の補正を行う必要がある。補正には以下の式を用いた。

$$l = \sqrt{(\Delta\alpha \cos \delta_1)^2 + (\Delta\delta)^2} \quad (2)$$

ただし、

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (3)$$

$$\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (4)$$

今回の観測で得られたスペクトルと過去に観測されたスペクトル、及び位置比較図と離角を以下で比較する。

4.1.1 G049.264+00.312

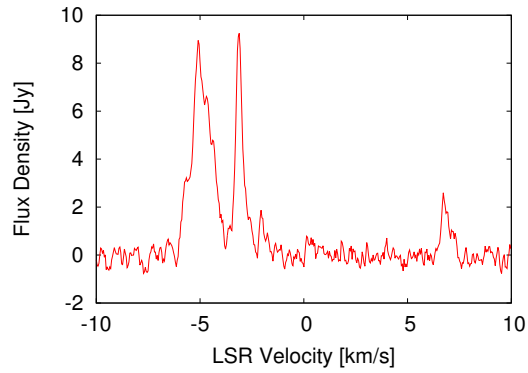


図 22 G049.264+00.312 のスペクトル

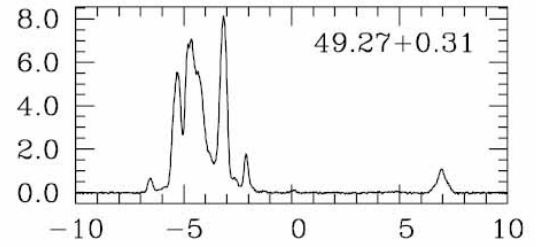


図 23 G049.27+00.31 のスペクトル (Pandian et al. 2007)

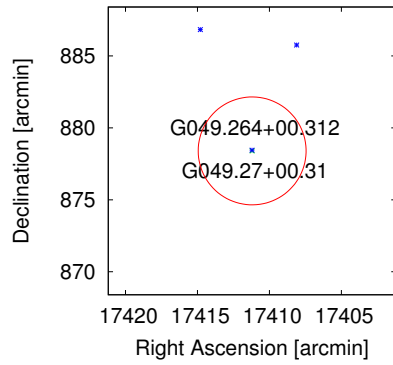


図 24 $l=49^\circ$ の位置比較図

位置比較図中の青点は既知の天体で緑点が今回の観測天体である。既知天体からの混入を確認するために、赤い円は日立局ビームサイズの3倍の大きさ(半径 7.5arcmin)でプロットした。G049.264+00.312 及び G049.27+00.31 の離角は(2)式より 0.07arcmin と近接しているため、G049.27+00.31 (α, δ) = (17411.1, 878.5)[arcmin] からの放射であると判断した。また今回の観測によって 5.1km/s 成分の強度変動が確認された。

4.1.2 G053.032+00.088 及び G053.036+00.112

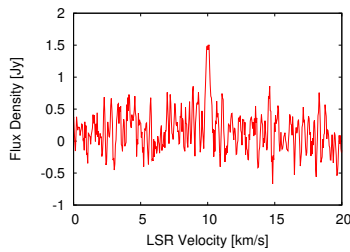


図 25 G053.032+00.088 のスペクトル

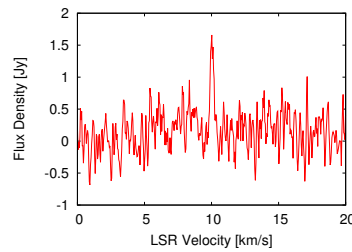


図 26 G053.036+00.112 のスペクトル

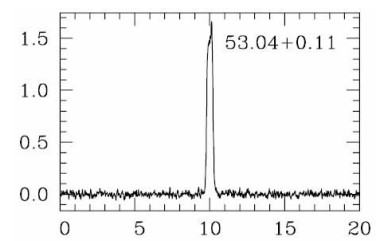


図 27 G053.04+00.11 のスペクトル (Pandian et al. 2007)

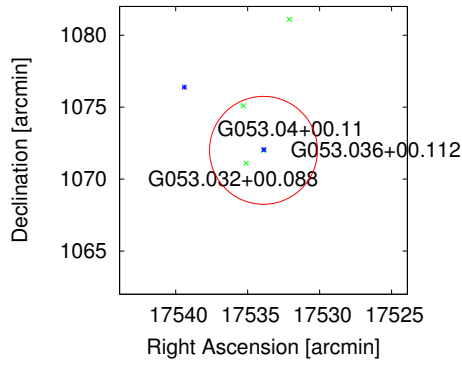


図 28 $l=53^\circ$ の位置比較図

この方向に対する結果、2つの BGPS 天体は G053.04+00.11 (α, δ) = (15733.9, 1072.1)[arcmin] からの混入とみられる。G053.04+00.11 から G053.032+00.022、G053.036+00.112 までの離角は (2) 式よりそれぞれ 1.47、0.02arcmin と近接しているため、G053.04+00.11 からの放射であると判断した。

4.1.3 G059.683+00.125、G059.695+00.187、G059.707+00.187

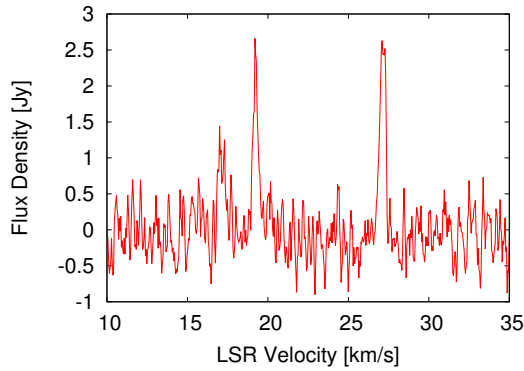


図 29 G059.683+00.125 のスペクトル

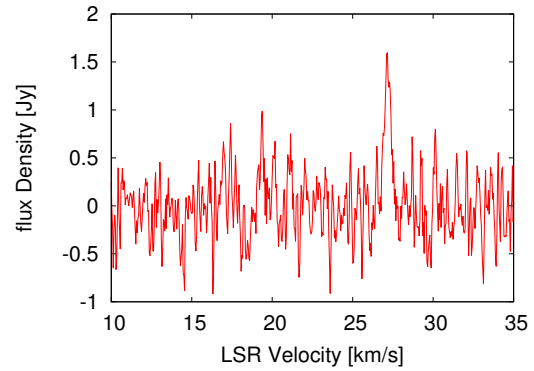


図 30 G059.695+00.187 のスペクトル

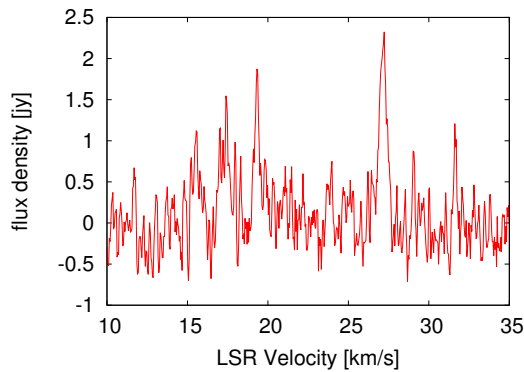


図 31 G059.707+00.187 のスペクトル

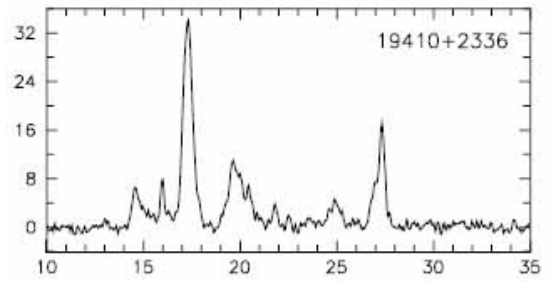


図 32 IRAS19410+2336 のスペクトル (Szymczak et al. 2000)

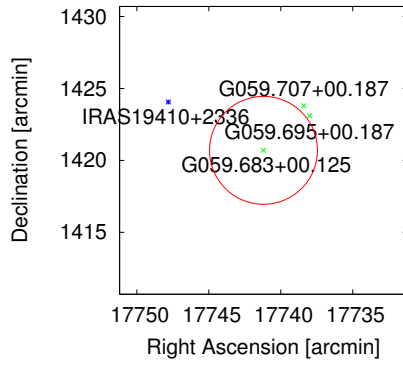


図 33 $l=59^\circ$ の位置比較図

4.1.4 G060.573-00.187

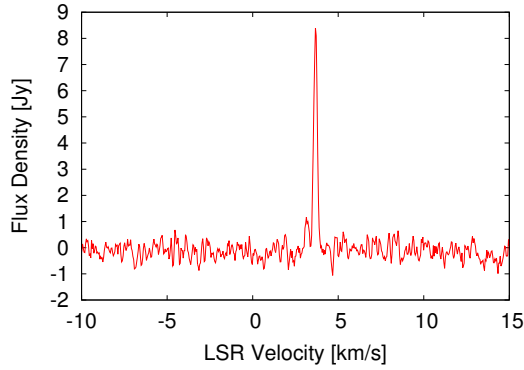


図 34 G060.573-00.187 のスペクトル

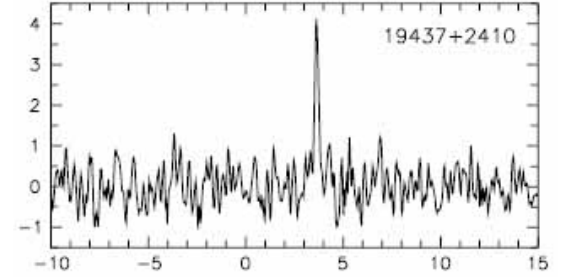


図 35 IRAS19437+2410 のスペクトル (Szymczak et al. 2000)

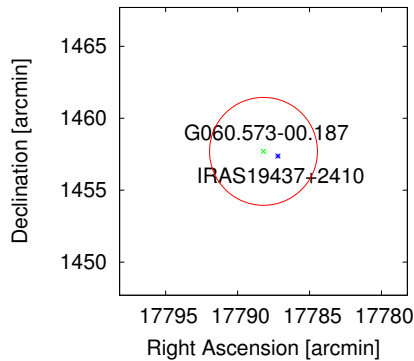


図 36 $l=59^\circ$ の位置比較図

3つのBGPS天体に対する結果、この天体はIRAS19410+2336 (α, δ) = (17714.9, 1444.7)[arcmin]からの混入とみられる。IRAS19410+2336からG059.683+00.125、G059.695+00.187、G059.707+00.187までの離角は(2)式よりそれぞれ6.97、9.03、8.62arcminである。日立局のビームパターンによって約30%の強度で混入が見られるためIRAS19410+2336からの放射であると判断した。またこの観測によって17km/sの速度成分の強度変動が確認された。

この方向に対する結果、IRAS19437+2410 (α, δ) = (17787.2, 1457.4)[arcmin]からの混入とみられる。IRAS19437+2410からG060.573-00.187までの離角は(2)式より0.92arcminと近接しているため、IRAS19437+2410からの放射であると判断した。またこの観測により3.7km/sの速度成分に強度変動が確認された。

4.1.5 G084.236+00.022、G085.260+00.008、G085.266+00.020、G085.378+00.022、G085.412+00.002

G084.236+00.022、G085.260+00.008、G085.266+00.020、G085.378+00.022、G085.412+00.002の5つのBGPS天体は、G085.40-00.00 (α, δ) = (18813.4, 2694.1)[arcmin]からの混入と思われるスペクトルが得られた。文献にスペクトルの記載がされていないため、過去(2014年通算日325日)に日立局で観測されたスペクトルとの形状比較を行った。以下に日立局で観測されたG085.40-00.00のスペクトルを示す。

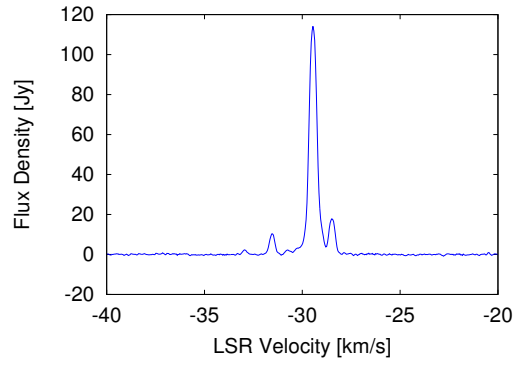


図 37 G085.40-00.00 のスペクトル (青線)

G085.40-00.00 の表示倍率を変更し同一グラフ上にプロットを行った。以下に各天体のスペクトルの比較図を示す。

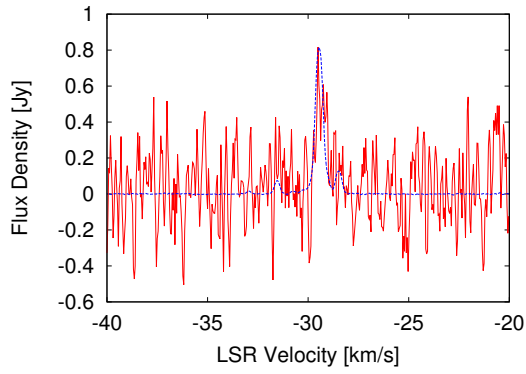


図 38 G085.236+00.022(赤) と G085.40-00.00(青) のスペクトル

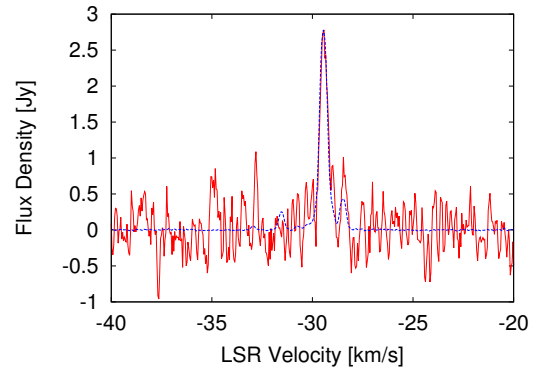


図 39 G085.260+00.020(赤) と G085.40-00.00(青) のスペクトル

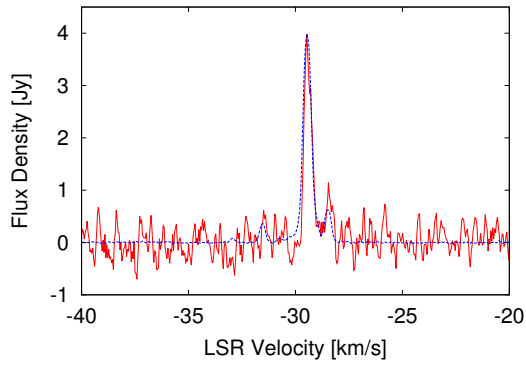


図 40 G085.266+00.022(赤) と G085.40-00.00(青) のスペクトル

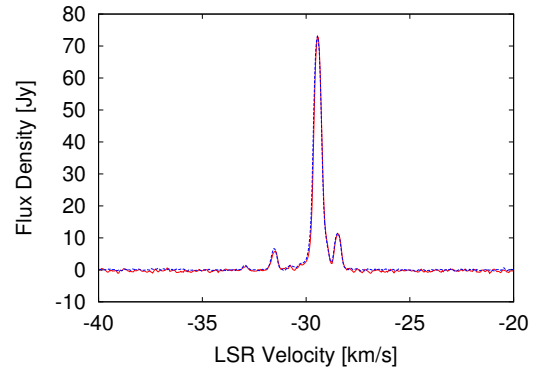


図 41 G085.378+00.022(赤) と G085.40-00.00(青) のスペクトル

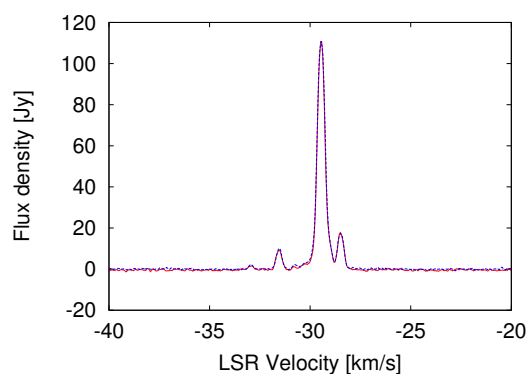


図 42 G085.412+00.002(赤) と G085.40-00.00(青) のスペクトル

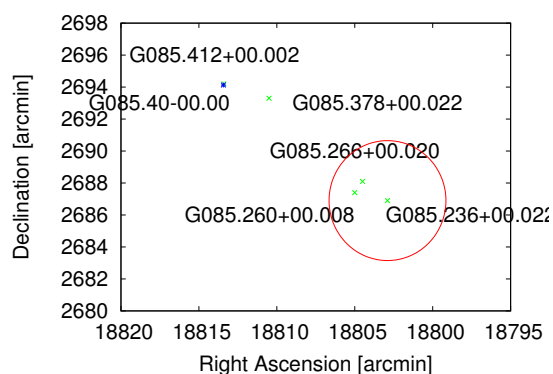


図 43 $l=85^\circ$ の位置比較図

混入源とみられる G085.40-00.00 からの離角を以下の表にまとめ、サイドローブパターンから見積もった混入強度と観測ピーク強度を比較した。

表 6: $l=85^\circ$ の強度比較

BGPS 天体名	離角 [arcmin]	予想強度 [Jy]	観測強度 [Jy]
G085.236+00.022	10.42	1	0.82
G085.260+00.020	9.03	3	2.78
G085.266+00.022	8.72	4	3.98
G085.378+00.022	2.24	×	73.07
G085.412+00.002	0.04	115	110.77

離角が 2 arcmin となるビームパターンは記述がなかったため、予想強度を見積もることができなかった。しかし、他の天体のスペクトルの形状やピーク速度、強度にもおよそその一致がみられるため、G085.40-00.00 からの放射であると判断した。またこの結果から、十分に強度の強い天体の場合 10 arcmin 以上離れた天体からのサイドローブからの混入が確認された。

4.2 新検出天体

観測で得られた 15 のスペクトルのうち、3 つの BGPS 天体で過去に検出されていないスペクトルが得られた。またその中で 2 天体が新検出と思われ、1 天体は前述の新検出のスペクトルの混入と思われる。前節同様、観測天体と既知天体のマッピングを行い、既知天体からの放射がないことを確認した。

4.2.1 新検出天体 G084.951-00.692

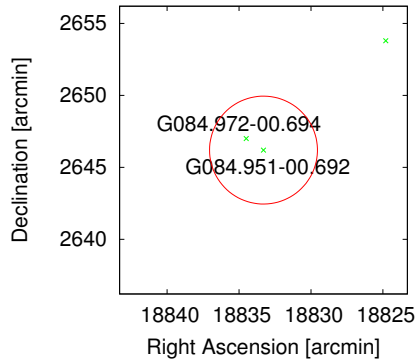


図 44 $l=84^\circ$ の位置比較図 (1)

位置比較図からもわかるように、この領域では過去にメーザーが発見されていなかった。新検出天体に 9 点法による観測を実施し、BGPS ダストコア中にメーザー源が存在しているかの確認を行った。

スペクトルの形状と速度成分を比較すると、G084.951-00.692(図 13) 及び G084.972-00.694(図 14) は同じメーザー源からの放射であると思われる。強い放射が得られている G084.951-00.692 に対し、9 点法の観測を実施した。9 点法の結果は以下の通りである。

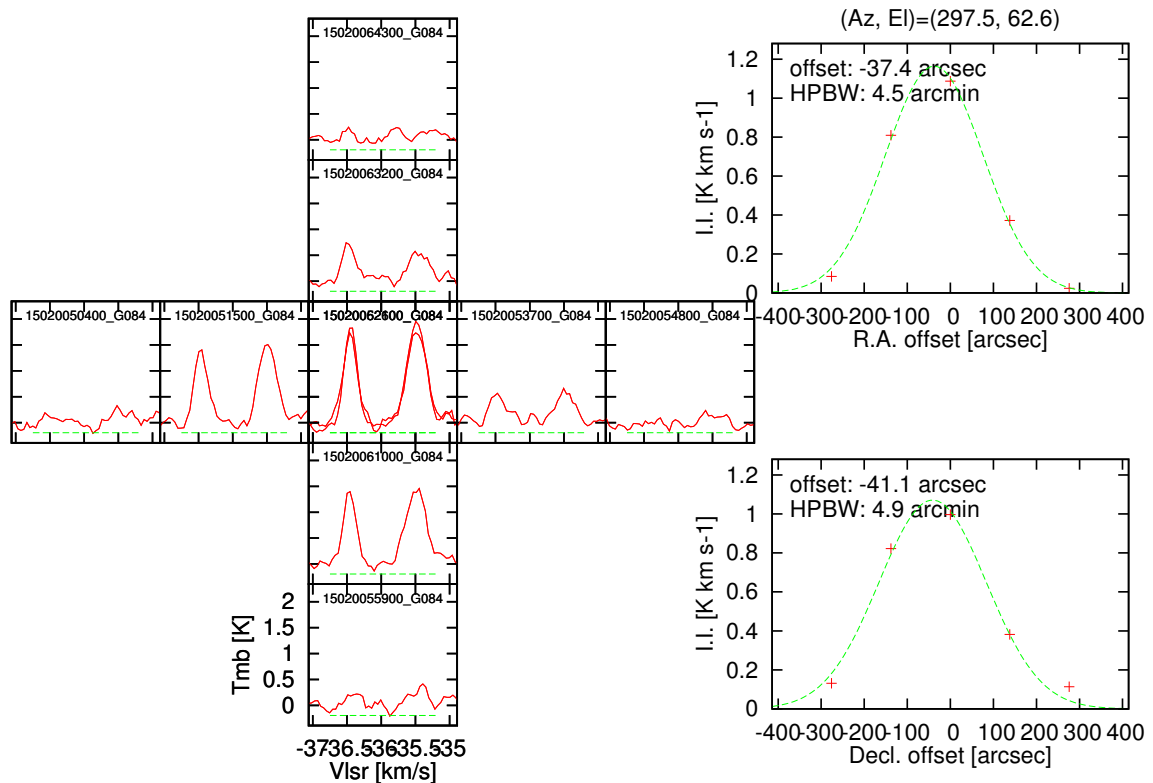


図 45 G084.951-00.692 の 9 点法観測

G084.651-00.692 について 9 点法観測を行ったところ上記のような結果が得られた。縦軸はアンテナ温度 [K] で、横軸は LSR Velocity [km/s] である。この結果からこのスペクトルは G084.951-00.692 に位置するダストコアから赤経方向に-37.4arcsec、赤緯方向に-41.1arcse ずれた位置からの放射であることが確認できた。

4.2.2 新検出天体 G084.984-00.532

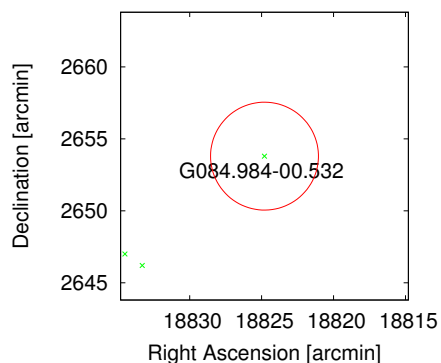


図 46 $l=84^\circ$ の位置比較図 (2)

位置比較図からもわかるように、この領域でも過去にメーザーが発見されていなかった。同様に 9 点法による観測を実施し、BGPS ダストコア中にメーザー源が存在しているかの確認を行った。

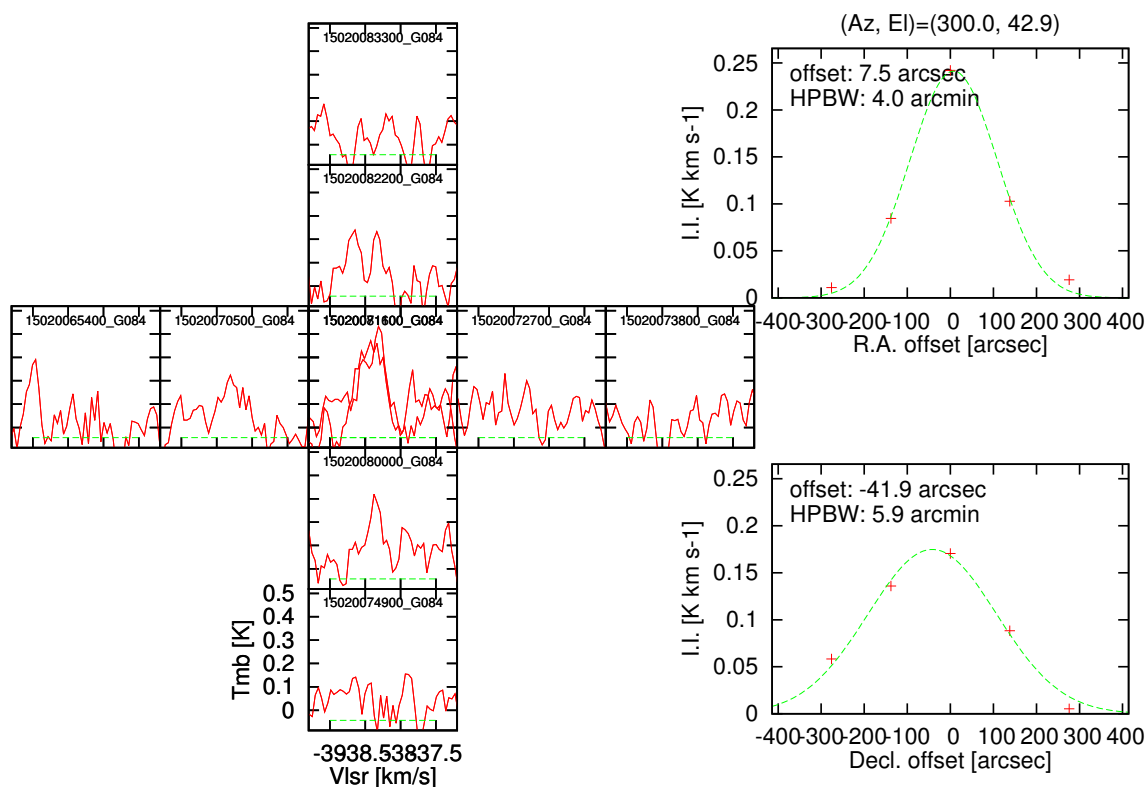


図 47 G084.984-00.352 の 9 点法観測

G084.984-00.352 について 9 点法観測を行ったところ上記のような結果が得られた。G084.951-00.692 を中心とするダストコア付近にメーザー源が存在することが確認できた。ところが、スキャン数が不足していたためにオフセットの値に信頼性が乏しいと思われる。メーザー源の位置を特定するためには、よりスキャン数を増やして S/N 比を向上する必要がある。

5 考察 II VERA を用いた今後のアストロメトリ観測の評価

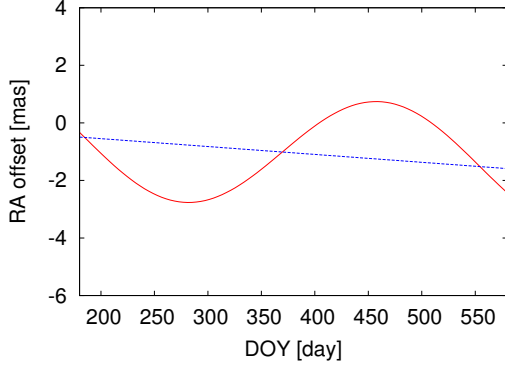


図 48 アストロメトリ観測で得られる年周視差曲線。

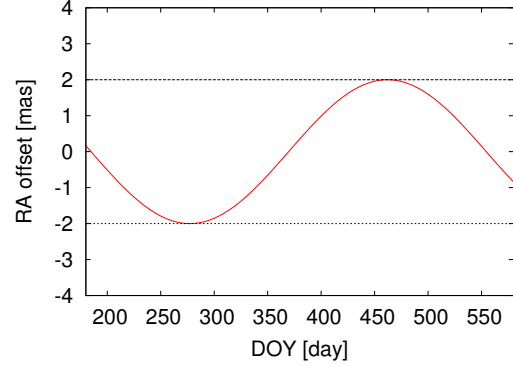


図 49 銀河回転を補正した年周視差曲線

1.1 節で述べたように、アストロメトリ観測とは、1 年間を通した観測を行うことで年周視差を直接的に測定する観測である。例えば、アストロメトリ観測で得た位置情報を 1 年に亘ってプロットを行うと、図 48 のように傾いた正弦曲線 (赤線) が現れる。ここで縦軸は赤経方向のオフセット [mas] で横軸は通算日 [day] とした。この傾き (青線) は銀河回転運動による位置のずれによるものであり、回転速度はメーザー源の位置 (銀河中心からの距離) に依存する。したがって銀河回転運動の補正を行い、図 49 のような正弦曲線が得た後に、その振幅を読み取ることで年周視差を求めることができる。

この章では今回の観測で新検出となった、比較的強度の高い G084.951-00.692 の観測データをもとに太陽からの概算距離と年周視差の予想を立て、VERA を用いたアストロメトリ観測が可能であるかを議論する。

5.1 kinematic distance 法による新検出天体 G084.951-00.692 の概算距離の導出

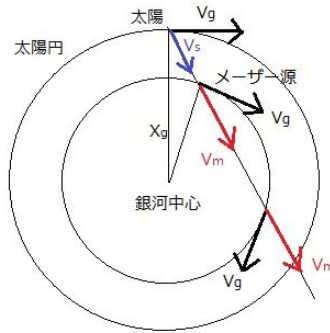


図 50 kinematic distance 法の概略図。銀河中心から太陽までの距離を半径とした円を太陽円と呼ぶ

kinematic distance 法とは銀河外縁部で銀河回転速度が一定であると仮定した場合 (銀河中心から 1kpc 以内ではこの近似が成り立たないため、kinematic distance 法は不適切)、銀河回転速度とメーザー天体の速度を用いて、太陽からメーザー天体までのおおよその距離を算出する方法である。

銀経 l を考慮すると、視線方向における太陽の速度 V_s 、メーザー天体の速度 V_m 、および視線速度 V_{LSR} には以下の関係がある。

$$V_{\text{LSR}} = V_m - V_s \quad (5)$$

$$V_s = V_g \sin l \quad (6)$$

$$V_m = V_g \cos \theta \quad (7)$$

これらにより、 V_g と V_s のなす角 θ は

$$\cos \theta = \frac{V_{\text{LSR}} + V_g \sin l}{V_g} \quad (8)$$

が導かれる。さらに銀河中心から太陽までの距離を X_g とすると、太陽からメーザー天体までの距離 X_m は

$X_g > X_m$ のとき

$$X_m = \frac{X_g \cos(l + \theta)}{\cos \theta} \quad (9)$$

$X_g < X_m$ のとき

$$X_m = \frac{X_g \cos(l - \theta)}{\cos \theta} \quad (10)$$

と算出できる。

新検出天体 G084.951-00.692 の概算距離 X_m の算出にあたり、銀河定数は $V_g = 246$ [km/s]、 $X_g = 8.4$ [kpc] (Green et al. 2011) を用いた。kinematic distance 法は、太陽円の外側の天体に対して 1 通りの解しか得られない。メーザー天体の速度 V_m は 2 つのピーク速度成分の平均値である -36.0 [km/s] を用いたところ、 $X_m = 5.9$ [kpc] という結果が得られた。

5.2 新検出天体 G084.951-00.692 の年周視差の算出

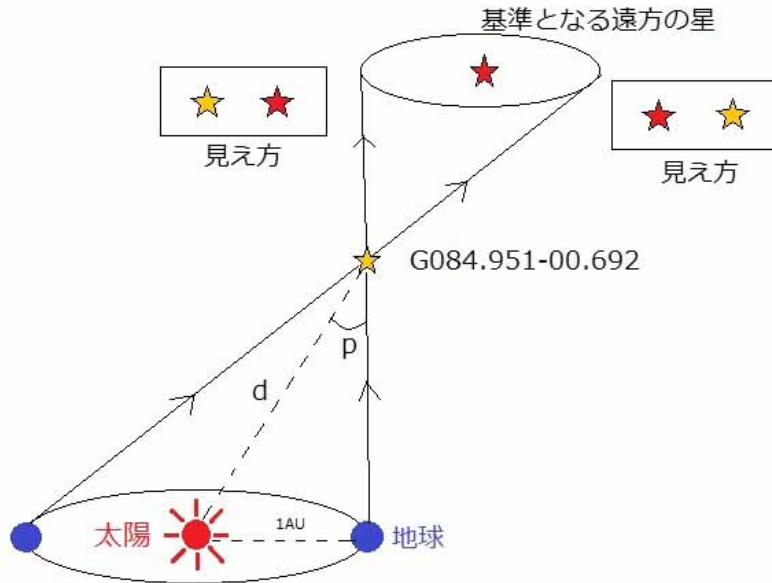


図 51 年周視差の概念図。比較的近傍の天体は遠方の天体を基準に楕円運動するように見える

年周視差とは、地球の公転運動による視差のために、近傍の天体の位置が遠方の天体に対して公転周期と同周期で変化する現象のことである。年周視差 p は天体までの距離 d に反比例するため、以下の式で算出できる。

$$p = \frac{1}{d} \quad (11)$$

G084.951-00.692 の年周視差を算出するにあたり、天体までの距離 d には前節で求められた $X_m = 5.9$ [kpc] を用いた。その結果、年周視差 $p = 0.17$ [mas] となった。

5.3 VERA の角度分解能の算出

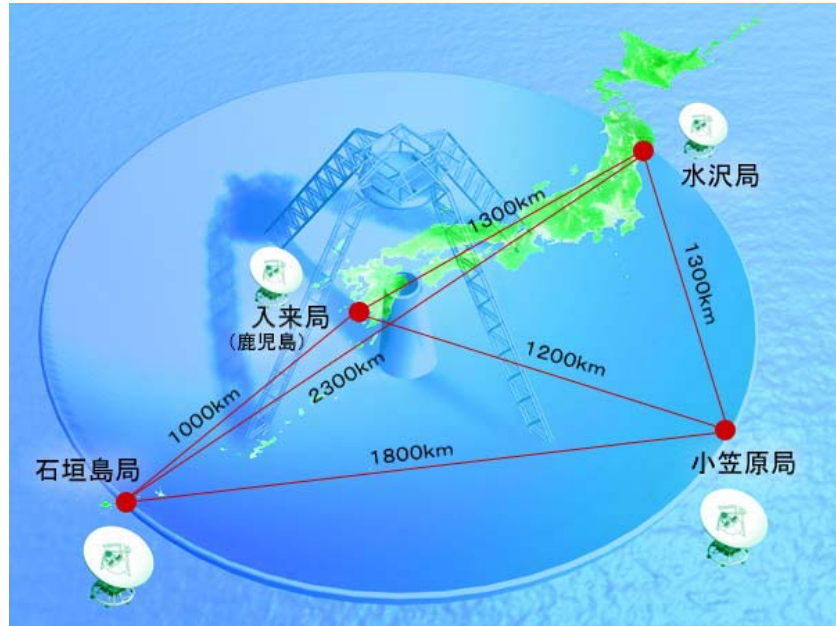


図 52 VERA による VLBI 観測の概念図. <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/system/index.html> より引用

国立天文台が所有する VERA 観測局は 4 局 (水沢局・入来局・小笠原局・石垣島局) であり、20m 電波望遠鏡 4 台を使用した VLBI によるアストロメトリ観測を行う。これによって基線長が最大となる水沢局～石垣島局間 (2270 km) を直径 D とした電波望遠鏡で観測を行った場合と同等の分解能が得られることになる。なお、基線長は antenna.sch にまとめられている水沢局と石垣島局の位置座標によって算出した。

光学望遠鏡の分解能 θ は、波長 λ または光速 c 、観測周波数 f を用いて、以下の式で求めることができる。

$$\theta = \frac{\lambda}{D'} = \frac{c/f}{D'} \quad (12)$$

D' は投影距離と呼ばれ、 $D' = D \sin \phi$ で導かれる。 ϕ には天体の高度が対応するが、ここでは水沢局と石垣島局で有効径が最大となる $\phi = 70^\circ$ を用いた。上記式に $D = 2270$ [km]、 $c = 3.00 \times 10^8$ [m/s]、 $f = 6.67 \times 10^9$ [Hz] を用いると、6.7GHz 帯における VERA の分解能は 4.35 [mas] との結果が得られた。

5.4 VERA によるアストロメトリ観測の評価

5.2 節、5.3 節にわたって G084.951-00.692 の年周視差 (0.17 mas) 及び VERA の分解能 (4.35 mas) を求めたが、一見すると VERA の分解能で G084.951-00.692 の固有運動を検出することは不可能に思われる。ところが、アストロメトリ観測 1 回の測定には 1 年間を通じて複数回の観測を必要とする。そのため観測回数を n とすると、それぞれの観測を独立なものとみなすことによって精度は $\sqrt{n}$ 倍で向上する。したがって観測回数を重ねることによって G084.951-00.692 の年周視差 (0.17 mas) を検出できる精度を高めることができる。

検証するにあたり、銀河回転による固有運動と、大気・受信機に由来する系統誤差は無視して議論を進めることとする。また、予想される年周視差曲線上で観測の優先度が高い領域 (長軸付近の軌跡) について、位置を特定するために必要な観測回数を導出する。次項では、上記の内容を検証するにあたって必要となる諸量を算出していく。

5.4.1 VERA の SEFD(システム雑音等価フラックス密度) の算出

SEFD(System Equivalent Flux Density) はシステム雑音温度等価フラックス密度と呼ばれ、受信機で発生するシステム雑音 T_{sys} [K] と天体のフラックス密度を比較するために換算した量である。したがって SEFD の

値が小さいほど、すなわち有効開口面積が大きくシステム雑音が低いほど、S/N 比が良くなる。SEFD はシステム全体の感度の目安となり、以下の式で算出できる。

$$\text{SEFD} = \frac{2k_B T_{\text{sys}}^*}{A_{\text{eff}}} \quad (13)$$

ここでの k_B はボルツマン定数で $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ [J/K] である。また T_{sys}^* はシステム雑音温度 [K]、 η_{eff} は開口能率である。さらに A_{eff} はアンテナ有効開口面積と呼ばれ、アンテナ半径を r とすると以下の式で定義される。

$$A_{\text{eff}} = \pi r^2 \eta_{\text{eff}} \quad (14)$$

VERA アンテナステータスに記載されている、 $T_{\text{sys}}^* = 130$ [K]、 $\eta_{\text{eff}} = 0.50$ を上記式に代入した結果、 $\text{SEFD} = 2284$ [$\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$] と求められた。

5.4.2 VERA による観測のノイズレベル (1σ) の算出

電波観測では天体からの放射以外に、受信機システムからの熱的な雑音や大気からの雑音が付加されてしまう。熱的な雑音の平均値 (1σ) は以下の式で算出できる。

$$1\sigma = \frac{\text{SEFD}}{\eta_{\text{bit}} \sqrt{N(N-1) \cdot \Delta B \cdot \tau}} \quad (15)$$

η_{bit} は量子化効率であり、 ΔB は受信周波数幅、 τ [s] は観測天体の積分時間である。 N には観測望遠鏡数が入る。

VERA は 2bit で信号の変換を行っている。2bit の量子化効率は $\eta_{\text{bit}} = 0.88$ である。また受信周波数幅は $\Delta B = B/n_{\text{ch}}$ (B : 受信帯域, n_{ch} : チャネル数) で定義されている。受信帯域 $B = 16$ [MHz]、 $n_{\text{ch}} = 16384$ であるため (VERA アンテナステータス)、定義式より $\Delta B = 977$ [Hz] となった。観測天体の積分時間は 23400 [s] とした。これは観測対象の G084.951-00.692 が石垣局と水沢局の両局で $\text{EL} > 10^\circ$ を満たす時間の半分である。半分になるのは VERA によるアストロメトリ観測の際に、観測天体以外に位置基準となる遠方の電波源を観測する必要があることに起因する。上記を踏まえて VERA4 局によるノイズレベルを算出すると、 $1\sigma = 0.12$ [Jy] となった。

5.4.3 VERA によるアストロメトリ観測の位置精度の向上

5.4.1 節ならびに 5.4.2 節で算出した値を用いて、アストロメトリ観測による年周視差の分解で満たすべき条件を求めた。年周視差を分解するには年周視差と同等の分解能では検出できず、年周視差による振幅を 3σ 以上で検出できると仮定する。したがって VERA は $0.17/3$ [mas] (=0.057 mas) の位置精度を達成する必要がある。

熱的な雑音を考慮した 1 つのメーザースポット (速度成分) に対する位置精度 $\Delta\theta$ は以下の式で算出できる。

$$\Delta\theta = \frac{\theta}{S/N} \quad (16)$$

ただし θ は分解能で、 S はメーザー源の強度、 N はノイズレベル (1σ) である。

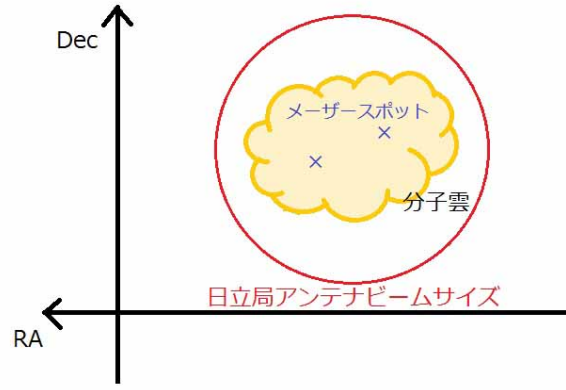


図 53 アンテナビームサイズ中に複数のメーザースポットがある場合の想像図

5.4 節の初めに述べたように、各観測における位置精度のずれは観測回数を n とすると、それぞれの観測を独立なものとみなすことによって $\sqrt{n}$ 倍向上する。さらに上記式の位置精度は、1 つのメーザースポットについての式である。G084.951-00.692 はスペクトルに 2 つのピークが見られるため、アンテナビーム中に 2 つのメーザースポット (速度成分) が存在していると考えられる。したがってこの 2 つのスポットが連動せず、独立なものであると仮定すれば位置精度 $\Delta\theta$ はさらに $\sqrt{2}$ 倍向上するものと思われる。ところが、アストロメトリ観測で優先度が高い 2 つの領域は、互いに独立ではないため、 $\sqrt{2}$ 倍の誤差を含むことになる。ゆえに VERA による G084.951-00.692 のアストロメトリ観測で満たされるべき条件式は以下の通りとなる。

$$\Delta\theta = \frac{\theta}{S/N \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{n}} < \frac{0.17}{3} \quad [\text{mas}] \quad (17)$$

ここに 5.4.1 節ならびに 5.4.2 節で算出した $\theta = 4.35$ [mas]、 $N = 0.12$ [Jy] を代入した。メーザー源の強度 S には G084.951-00.692 のピーク強度の 20% の値である 1.3 [Jy] を用いた。これは VLBI の手法で局所的な観測を行うことによって、天体全体のフラックスの大半が失われてしまうことに由来する (Sugiyama et al. 2008)。以上の値を用いて不等式を解くと、 $n > 50.2$ となった。この結果から、ある特定の時期に G084.951-00.692 を対象にそれぞれ 51 回の観測を実行することで正確な距離の算出が可能となることが分かった。

この精度を保ったまま観測回数を減らすためには、JVN を始めとした VERA よりも規模の大きな VLBI システムを使用することが不可欠であると考えられる。また今後の観測によって G084.951-00.692 に新たなメーザースポットが検出されれば、それに応じた感度の向上が見込める。しかし、これによって観測回数を大幅に削減した場合でも、観測を実施することは困難であると考えられる。

6 まとめ

星形成領域をまとめた BGPS(Bolocam Galactic Plane Survey) データベースから、VERA によるペルセウス座腕サーベイの空白領域中 ($49^\circ < \text{銀経 } l < 86^\circ$) の 46 のダストコアを選出し、6.7GHz 帯のメタノールメーザー探査を行った。観測には日立 32m 電波望遠鏡を使用し、2014 年 12 月 27 日と 2015 年 1 月 20 日の 2 日間で行った。

観測の結果、全 46 天体のうち既知の 5 天体と新たに 2 天体からの放射が見つかった。新検出天体である G084.951-00.692 及び G084.984-00.532 には 9 点法観測を実行し、ダストコアからの放射であることを確認した。

比較的強い放射が見られた G084.951-00.692 について、kinematic distance 法を用いた概算距離と年周視差を見積もり、VERA によるアストロメトリ観測が可能であるかの検討を行った。その結果、銀河回転による固有運動及び、大気・受信機に由来する系統誤差を無視するという仮定のもとで、観測の優先度が高い領域 (長軸付近の軌跡) で 51 回以上の測定が必要であることが分かった。特定の短い期間に 51 回の観測を実施することは困難であり、より輝度温度の高いメーザー源を用いる必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々からのご協力を頂きましたことに感謝の意を表します。指導教員である百瀬宗武教授には、物理学・天文学の基礎から丁寧にご指導いただきました。米倉覚則准教授、研究員の杉山孝一郎さん、宮本祐介さんには、観測や解析ならびに発表の場面で大変お世話になりました。また、共に研究を行った大橋君のご協力もあり、無事に本研究を進めることができました。ご指導いただいた皆様、電波観測研究室の皆様にご心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. Honma, et al. 2012, PASJ, 64, 136
- [2] M. J. Reid, et al. 2014, ApJ, 796, 2
- [3] S. Goedhart, et al. 2004, MNRAS, 355, 553
- [4] K. L. J. Rygl, et al. 2010, A&A 511, 2
- [5] N. Matsumoto, et al. 2011, PASJ, 63,1345
- [6] K. N. Menten, et al. 1991 ApJ, 380, 75
- [7] C. J. Cyganowski, et al. 2009, ApJ, 702, 1615
- [8] S. P. Ellingsen, et al. 2005, MNRAS, 359, 1498
- [9] R. Valdetaro, et al. 2001, A&A 368, 845
- [10] K. Sunada, et al. 2007, PASJ, 59, 1185
- [11] J. H. Taylor, J. M. Cordes, 1993, ApJ, 411, 674
- [12] 坂井伸行, 2014, 新規観測提案 Perseus Arm Gap(PAG) project
- [13] T. M. Dame, et al. 2001, ApJ, 547, 792
- [14] E. Rosolowsky, et al. 2010, PASP, 438, 76
- [15] Y. L. Shirley, et al. 2013, ApJS, 209, 2
- [16] Y. Xu, et al. 2009, A&A, 507, 1117
- [17] J. D. Pandian, et al. 2007, ApJ, 656, 255
- [18] M. R. Pestalozzi, et al. 2005, A&A 432, 737
- [19] 古川尚子, 2014, master catalog
- [20] 古川尚子, 2014, 6.7GHz メタノールレーザー 9.621+01 を用いた日立アンテナビームパターン
- [21] 杉山孝一郎, 2007, kinematic distance 算出法
- [22] J. A. Green, et al. 2011, ApJ, 733, 27
- [23] 国立天文台 VERA アンテナステータス <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/restricted/CFP2015A/status15A.pdf>
- [24] 国立天文台 VERA <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/system/index.html>
- [25] K. Sugiyama, et al. 2008, PASJ, 60, 1001
- [26] 福井康雄編, シリーズ現代の天文学 6. 星間物質と星形成, 日本評論社, 2008
- [27] 中井直正編, シリーズ現代の天文学 16. 宇宙の観測 II 電波天文学, 日本評論社, 2009