

セイファート銀河 NGC 1052 中心核の自由-自由吸収プラズマ

亀野 誠二*, 澤田-佐藤 聡子*, 柴田 克典*, 井上 允*, 輪島 清昭†, 今井 昌文‡

1 はじめに

GHz-Peaked Spectrum (GPS) 電波源は進化段階の初期 ($10^3 \sim 10^5$ 年) にあると考えられている天体で (O’Dea 1998)、その詳細については本集録の亀野他「GPS 電波源の多周波 VLBI サーベイ観測」を参照されたい。GPS 電波源は GHz 帯にスペクトルのピークを持ち (O’Dea et al. 1991)、ピークより低い周波数帯では右上がりのスペクトルを示す。右上がりのスペクトルは従来はシンクロトロン自己吸収 (SSA: Synchrotron Self-Absorption) によるものと考えられていた (Readhead et al. 1996, Snellen 1997) が、自由-自由吸収 (FFA: Free-Free Absorption) の影響である可能性が Bicknell et al. (1997) によって指摘されており、最近の VSOP 観測によって FFA でしか説明できない例が GPS 電波源 OQ 208 で見いだされた (Kameno et al. 2000)。FFA は低温高密度のプラズマ中で起こる現象であり、OQ 208 の場合では電子温度 $10^4 < T_e < 6 \times 10^7$ K、電子密度 $600 < n_e < 7 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ という値が求まっている。低周波側のカットオフが FFA によるものだとすると、GPS 電波源の電波ローブはこのような低温高密度のプラズマに覆われていることになり、電波ローブの発達に影響を与えることになる。

そこで多数の GPS 電波源に対するサーベイ観測を行ったので、その結果については「GPS 電波源の多周波 VLBI サーベイ観測」で報告する。一方、FFA 吸収プラズマの分布を調べてその性質を知ること重要である。そのためには近傍にある GPS 電波源を高い空間分解能で観測する必要がある。

NGC 1052 は GPS 電波源の中で $z = 0.0049$ (ハッブル定数 $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ を仮定すると距離は 20 Mpc) と最も近くにある天体であり、FFA プラズマの分布を細かく調べるには最も適した天体である。ちなみに 1 mas は 0.1 pc に相当する。しかも VLBI 天体には珍しくジェットとカウンタージェットの両方が検出されていて、モニター観測でノットが運動していることが分かっている (Kellermann et al. 1998) ので、中

心核成分を同定すればジェット側とカウンタージェット側両方の見かけの速度が分離できて、ジェットの視線角がわかると期待できる。また水メーザー天体としても知られていて (Braatz et al. 1996)、カウンタージェット側に沿ってメーザースポットが分布していることが VLBA で観測されている (Claussen et al. 1998)。

私たちの目的は、GPS 電波源の中で最も近くにある NGC 1052 を 3 周波で同時に VLBI 観測を行い、そのスペクトル指数分布から FFA プラズマの分布を調べることである。

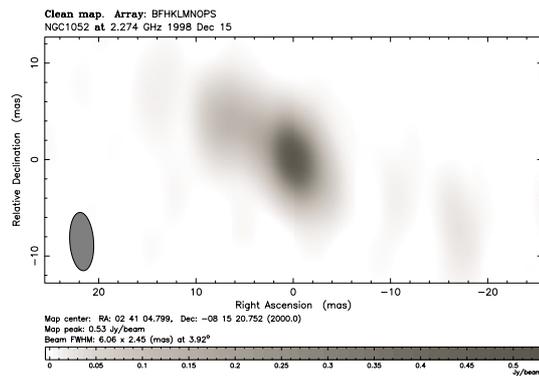


図 1: 2.3 GHz での NGC 1052 のマップ

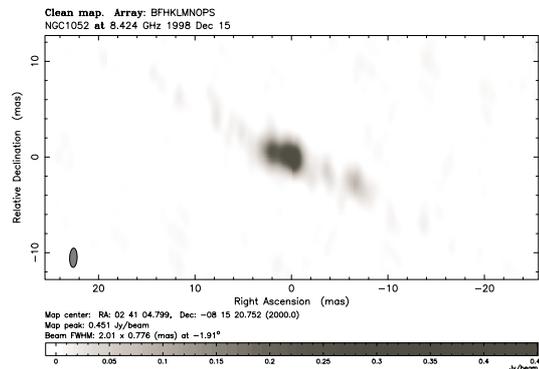


図 2: 8.4 GHz での NGC 1052 のマップ

*国立天文台

†茨城大

‡総研大

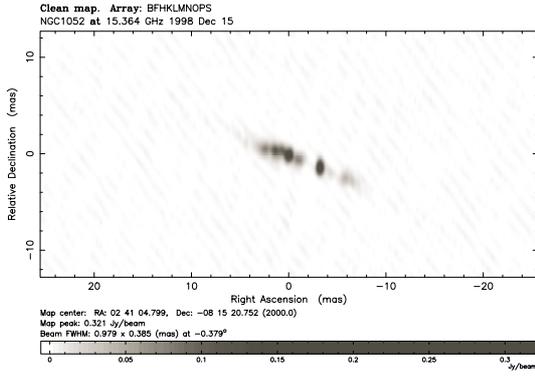


図 3: 15.4 GHz での NGC 1052 のマップ

表 1: 合成マップの画質

周波数 (GHz)	長軸 (mas)	短軸 (mas)	位置角 (°)	雑音レベル (mJy/beam)
2.3	2.6	6.9	3.2	1.25
8.4	0.74	1.97	-2.5	2.28
15.4	0.39	1.04	-2.6	0.82

2 観測と解析

観測は VLBA による 9 天体の GPS サーベイとして、1998 年 12 月 15 日に行われた。観測周波数は 2.3, 8.4, 15.4 GHz の 3 周波である。相関処理は NRAO VLBA 相関器で行われた。相関データのフリッジフィッティング・振幅較正には AIPS を用いた。イメージング処理および自己較正は DIFMAP を用いて行った。ビジビリティは uniform な重みづけをした。

3 結果

得られた 3 周波でのマップを図 1, 2, 3 に示す。合成ビームの大きさと画質については表 1 にまとめている。

4 考察

4.1 成分ごとのスペクトル

15.4 GHz のマップでは明るく独立した成分が少なくとも 3 個あるので、これらに対して成分 A, B, C とラベルを付ける。成分 A, C は 8.4 GHz および 2.3 GHz でも検出でき、その離角がどの周波数でも 7 ± 1 mas であることから、同一成分であると判断した。その中央にある成分 B は 8.4 GHz では同定できたが、2.3 GHz では対応する成分が検出できなかった。

この同定結果を元にして、成分ごとのフラックス密

度と大きさを AIPS の IMFIT で算出したものを表 2 にまとめた。

表 2: 成分の同定

成分	周波数 (GHz)	フラックス密度 (mJy)	長軸 (mas)	短軸 (mas)
A	2.3	968 ± 6	4.22	1.19
	8.4	1752 ± 6	3.40	0.86
	15.4	1311 ± 2	-	-
B	2.3	< 5.6	-	-
	8.4	77 ± 7	3.40	0.86
	15.4	488 ± 2	< 0.49	< 0.35
C	2.3	12.6 ± 4	2.11	1.43
	8.4	225 ± 7	2.39	0.94
	15.4	189 ± 3	1.63	0.62

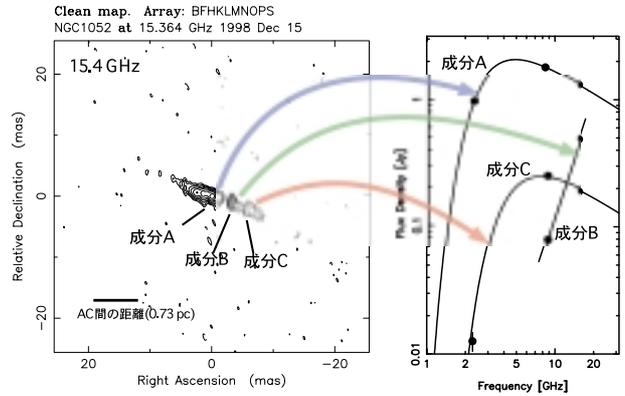


図 4: NGC 1052 の成分とスペクトル

図 4 は各成分のスペクトルである。成分 B は 8.4 GHz と 15.4 GHz との間で最大 $\alpha = 4.8$ という大きなスペクトル指数を示し、SSA の限界 $\alpha = 2.5$ を越えている。実線はジェットからのシンクロトロン放射が FFA で受けた場合のモデル

$$S_\nu = S_0 \nu^\alpha \exp(-\tau_0 \nu^{-2.1}) \quad (1)$$

でフィットしたスペクトルを示して、よくフィットしている。ここで、 ν は周波数 (GHz)、 S_0 は FFA がいない場合の 1 GHz でのフラックス密度 (Jy)、 τ_0 は FFA 係数である。 α は FFA がいない場合のスペクトル指数で、ここでは成分 A と C の 8.4 GHz と 15.4 GHz のフラックス密度から $\alpha = -0.65$ を用いた。成分 B は 2 周波しかデータ点がないためフィットはできないので、成分 A と B についてのみフィットの結果を表 3 に示す。

表 3: 成分の同定

成分	S_0	τ_0
A	70.0 ± 1.9	17.4 ± 0.5
C	12.6 ± 2.6	57.9 ± 18.3

結果から分かるように、成分 C は A よりも FFA の吸収係数が大きく、吸収を受けなかったと仮定した場合の元々のフラックス密度は小さい。この解釈については 4.3 節および 4.4 節で述べる。

以上の結果から、スペクトルの低周波側のカットオフは SSA よりも FFA で説明するのが望ましいと考えられる。

4.2 中心核成分の同定

どの成分が中心核であるか同定するために、ここではスペクトル指数と輝度温度の二つの観点から考察する。

まず各成分の 15.4 GHz における輝度温度は、成分 A: $T_b = 3.3 \times 10^9 \text{K}$ 、成分 B: $T_b > 2.1 \times 10^{10} \text{K}$ 、成分 C: $T_b = 1.4 \times 10^9 \text{K}$ となった。成分 B は分解できなかったため下限値であるが、最も輝度温度が高い成分であることから中心核であることが示唆される。

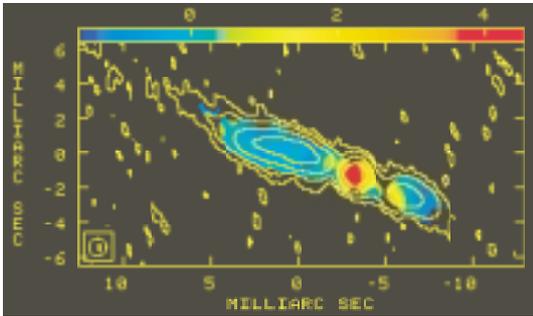


図 5: 15.4 GHz と 8.4 GHz 間のスペクトル指数分布 (疑似カラー) と 15.4 GHz でのマップ (等高線)。2 mas のビームで畳み込んである。

次にスペクトルであるが、成分 B は 15.4 GHz でも右上がりの (光学的に厚い) スペクトルを示すのに対して、成分 A と C では右下がりの光学的に薄いスペクトルである。スペクトル指数分布を見ても、成分 B では $\alpha > 4$ を示すのに対して、成分 A と C では $\alpha \sim -0.65$ である。この事実も成分 B が中心核であることを示している。

以上の考察から、成分 B が中心核であるという結論が得られる。したがって、成分 A および C は双方向に

伸びるジェット成分であることが分かる。

4.3 ジェット視線角の見積もり

NGC 1052 が両方向のジェットを持つ天体であることが改めてはっきりしたので、ノットの固有運動からジェットの視線角を求めることができる。ジェットは元々双方向に同じ速さ β で吹き出っていて輝度も対称であると仮定する。ジェットの視線に対する角度を θ とすると、近づくジェットの見かけの速度 β_{app} と遠ざかるジェットのそれ β_{rec} は、

$$\beta_{\text{app}} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \quad (2)$$

$$\beta_{\text{rec}} = \frac{\beta \sin \theta}{1 + \beta \cos \theta} \quad (3)$$

で与えられる。

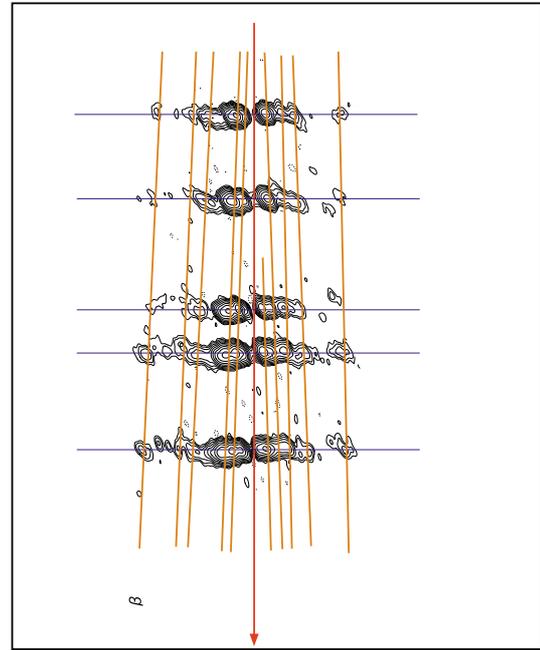


図 6: ジェット成分の固有運動。Kellermann et al. (1998) による約 2 年間のモニターから求めた結果。

今回明らかになった中心核成分を参照点として、Kellermann et al. (1998) によるモニター観測結果を用いて固有運動を求めると、 $\beta_{\text{app}} = 0.316 \pm 0.06$ 、 $\beta_{\text{rec}} = 0.216 \pm 0.06$ であった。この結果から、 $\beta = 0.314 \pm 0.08$ 、 $\theta = 53^\circ \pm 13$ が得られた。

検証のために、ドップラー増幅効果による輝度比と比較してみる。ジェットとカウンタージェットの輝度比 R は、

$$R = \left(\frac{1 + \beta \cos \theta}{1 - \beta \sin \theta} \right)^{3-\alpha} = 4.0_{-2.6}^{+7.5} \quad (4)$$

が期待される。これは観測された成分 A と C の輝度比 $R = 6.9$ と矛盾しない。

4.4 FFA プラズマ球のモデル

簡単のため、FFA を起こすプラズマは半径 R の球状に一樣に分布していると仮定して、その半径を見積もってみる。 τ_0 は

$$\tau_0 = 0.46T_e^{-\frac{3}{2}}n_e^2L \quad (5)$$

で与えられるのでプラズマ中の光路長に比例する。成分 A と C での τ_0 の差は、ジェットの視線角 $\theta = 53^\circ$ によるプラズマ中の光路差の差に比例する。また、A と C の見かけの離角は 0.73 pc である。上記のモデルと観測事実を合わせると、プラズマ球の半径 $R = 1.04 \pm 0.49$ pc が得られる。

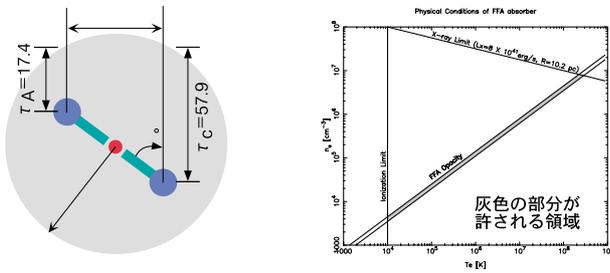


図 7: 一樣なプラズマ球による FFA のモデル

次にプラズマ球の温度と密度を見積もる。FFA から得られた結果より、

$$\tau_A + \tau_C = 0.46T_e^{-\frac{3}{2}}n_e^2R = 16.1 \pm 3.9 \quad (6)$$

より、 T_e と n_e の制限 (図 7 中の FFA opacity) が得られる。また、Weaver et al. (1999) による X 線光度 $L_{0.2-10\text{keV}} = 8 \times 10^{41}$ ergs s^{-1} は中心核成分と FFA プラズマの放射の総和であるので、FFA プラズマからの制動放射はこの観測値以下である。したがって、

$$L_X = 7.3 \times 10^{20}T_e^{\frac{1}{2}}n_e^2R^3 < 8 \times 10^{41} \quad (7)$$

が得られる。さらにプラズマが完全電離する条件 $T_e > 10^4$ K を加えると、

$$10^4 < T_e < 3 \times 10^8 \text{K} \quad (8)$$

$$4 \times 10^3 < n_e < 8 \times 10^6 \text{cm}^{-3} \quad (9)$$

という値が求まる。

この結果は不確定性が大きいですが、NGC 1052 のジェットが半径 1 pc という小さい領域の高密度なプラズマに覆われていることを示したものである。

5 まとめ

今回、GPS 電波源の中でもっとも近くにある NGC 1052 を 3 周波で同時観測することによって、成分の同定とスペクトル解析が可能になった。中心核成分を同定することによってモニター観測の参照点が定まり、ジェットとカウンタージェットの見かけ速度が測定できて、ジェットの真の速度と視線角を見積もることができた。スペクトル解析から FFA の吸収係数をもとめ、FFA プラズマのサイズ・温度・密度について情報が得られた。これらの観測結果から求めた NGC 1052 の構造を図 8 に示す。

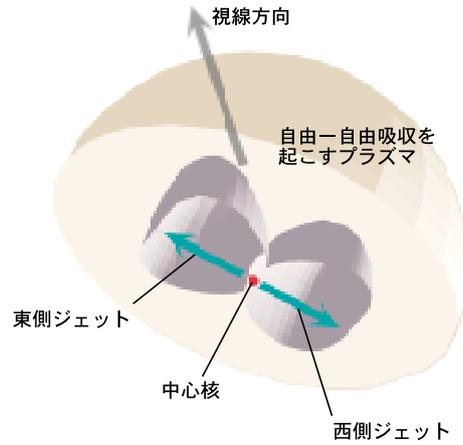


図 8: 今回の観測で明らかになった NGC 1052 の構造

参考文献

- Bicknell G. V., Dopita M. A., O'Dea C. P. O. 1997, ApJ 485, 112
- Braatz J. A., Wilson A. S., Henkel C. 1996, ApJS 106, 51
- Claussen M. J., Diamond P. J., Braatz J. A., Wilson A. S., Henkel C. 1998, ApJL 500, 129
- Kamenou S., Horiuchi S., Shen Z.-Q., Inoue M., Kobayashi, H., Hirabayashi, H., Murata Y. 2000, PASJ 56
- Kellermann K. I., Vermeulen R. C., Zensus J. A., Cohen M. H. 1998, AJ 115, 1295
- O'Dea C. P., Baum S. A., Stanghellini C. 1991, ApJ 380, 66
- O'Dea C. P. 1998, PASP 110, 493
- Readhead A. C. S., Taylor G. B., Xu W., Pearson T. J. 1996, ApJ 460, 612
- Snellen I. A. G. in *A Population Study of Faint Gigahertz Peaked Spectrum Sources*, PhD Thesis, Leiden Observatory
- Weaver K. A., Wilson A. S., Henkel C., Braatz J. A. 1999, ApJ 520, 130