

影絵の電波天文学

自由-自由吸収でさぐる電波銀河の中心部

亀野 誠二

〈国立天文台 VSOP 室 〒 181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kameno@hotaka.mtk.nao.ac.jp

VSOP (VLBI Space Observatory Programme: 宇宙空間 VLBI) や VLBA (Very Long Baseline Array: 米国立電波天文台の VLBI) などの近代的な電波干渉計を使って、活動銀河核の中心数 pc スケールに低温・高密度のプラズマが分布する様子を明らかにした。観測したのは電波銀河の中でも年齢が 10^3 - 10^4 年ととても若いと考えられている GHz-Peaked Spectrum (GPS) 電波源に分類される OQ 208 という電波銀河で、連続波放射の低周波 (5 GHz 以下) 帯に強い吸収を発見し、自由-自由吸収を起こす低温・高密度のプラズマの存在を明らかにした。さらに活動銀河 NGC 1052 では、遠ざかる側のジェットだけを覆う非対称な自由-自由吸収を見つけ、プラズマが環体 (トーラス) 状に分布していることを示した。プラズマが演じる吸収の「影絵芝居」、はじまりはじまり……

1. 「はるか」の初期観測から

1997年2月12日に打上られた電波天文衛星「はるか」は、2月27日に直径10mのアンテナを無事展開、5月には初めての干渉縞を三鷹相関局にて検出し、6月には米国・ソコロ相関局にて初めての電波写真撮影に成功していた¹⁾。世界初の本格的な宇宙空間 VLBI (Very Long Baseline Interferometry: 超長基線干渉計) である VSOP の幕開けだ。初期性能試験として数多くの電波写真を撮影すべく、7月3日には電波銀河 OQ 208 (1404 + 286) を周波数 1664 MHz で観測した。たまたま「はるか」の姿勢条件がよかったために選ばれた天体である。このデータ処理は国立天文台・三鷹相関局に割り振られた。

当時ソコロ相関局は米国立電波天文台 (NRAO) の VLBI 専用機である VLBA の電波写真を量産する実績を持っていた一方で、稼働を始めたばかりの三鷹相関局は国内 VLBI 網で得られた数枚の電波写真を処理した経験しかなく、いきな

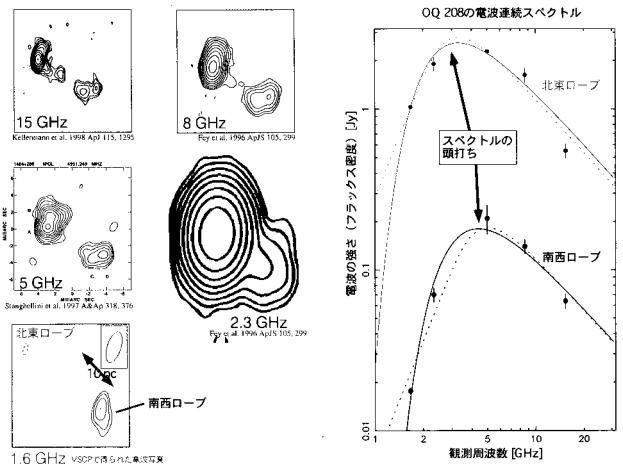


図1: 左: OQ 208 をさまざまな周波数で観測した電波写真。北東と南西の二つの電波ローブは、周波数が低くなるほど非対称性が強くなるのがわかる。右: 電波ローブの連続スペクトル。実線は自由-自由吸収モデルでフィットした場合。破線はシンクロトロン自己吸収モデル。明るい北東ローブよりも、暗い南西ローブのほうで「頭打ち周波数」が高いことがわかる。

り VSOP の処理ができるかどうか、不安だった。そこで、堀内真司および南 仁東 (北京天文台・当時国立天文台客員教授) ・筆者の三人で、独立に別々の手法を使って電波写真の像合成をした。図 1

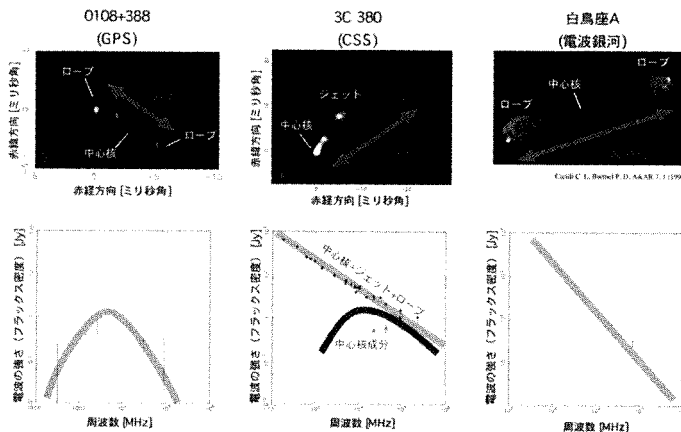


図2：典型的な GPS 電波源 (0108 + 388), CSS 電波源 (3C 380), 電波銀河 (白鳥座 A) の電波で見た形状とスペクトル。白鳥座 A は二つの電波ローブが 200 kpc もの広がりを持つのにに対して, 3C 380 では 100 pc (ただし外側に 10 kpc ほどに広がった電波ローブを持っている), 0108 + 388 ではわずか 25 pc ほどの小ささである。大きさが 4 桁もちがうのに, 中心核から両側に広がる電波ローブの構造は基本的に変わらない。白鳥座 A や 3C 380 では電波ローブ成分のスペクトルがほぼまっすぐに右下がりなのに対して, 0108 + 388 では凸型になっている。3C 380 の中心核成分だけを取り出すと凸型だが, 輝度温度が 10^{11} K と高いのでシンクロトロン自己吸収で説明できる。

に示すような電波写真を三人とも得るに至ったが, 過去にこの天体を観測した結果とずいぶん違っている。例えば Stanghellini らによる 5 GHz での観測²⁾では, 約 7 mas (milliarcsec: ミリ秒角) 離れた二つの成分があって電波強度の比は北東:南西 = 11:1 だが, VSOP の観測では 60:1 とずいぶん非対称になっている。南西側がこんなに弱いのは処理に間違いがあるからでは…と注意深く調べてみたが, 間違えるのが難しい巡回位相 (closure phase) だけを使ってもこのような結果になってしまう。他の周波数での結果 (図 1) を見ると, 周波数が低くなるほど非対称になっていることに気付いた。「やっぱり非対称なのは間違いじゃない。」

2. 生まれたての電波銀河だった

電波銀河は単体では宇宙で最も大きい天体で, ものによっては数 Mpc (メガパーセク = 10^6 pc, 1 pc

= 3.08×10^{16} m) にも達する。

電波銀河は可視光で観測すると, 銀河団の中心にある巨大楕円銀河であることが多い。とは言っても広がりはいずれ数 10 kpc 程度であり, 電波で見た姿とはずいぶん違っている。電波で見ると, 中心核から双対にジェットが噴き出していて, 先端でキノコ雲状の電波ローブを形成している構造が典型的である。この電波ローブの差し渡しはモノによっては数 Mpc に達するわけだ。

このような大きさに達するまでには長い時間が必要で, 光速の 0.1 倍で電波ローブが成長したとしても, 10^7 - 10^8 年かかる。すると, 小さな電波銀河は生まれたてに違いない³⁾, と考えつくだろう。電波銀河がどのように誕生し成長するかを調べるためには, 生まれたてのヤツを観測して性質と環境を探ることが重要だ。そのため小さい電波銀河は多くの研究者の関心を集

めている。注意すべきは, 小ささが見かけ上のものと区別しなくてはいけないことだ。例えば BL Lac 天体や一部のクェーサーなどはジェットの方向がたまたま視線方向に近いので, 中心核と近傍数 pc のジェットが極端に増幅されて明るく見え, 電波ローブはほとんど見えずに小さい成分だけが観測される。このような天体は中心核の平坦なスペクトルが卓越する。一方, 電波銀河では右下がりのスペクトルを示す電波ローブの放射が卓越するので, 電波の連続スペクトルによって電波銀河を選別できる。また, 中心核成分は電波の強さが大きく時間変動することが多いのに比べて, 電波ローブはほとんど電波の強さが変動しないので, 時間変動の有無でも判別が可能だ。スペクトルが右下がりな小さい天体。この性質を備えたものを, Fanti らは Compact Steep Spectrum (CSS) 電波源と呼んで若い電波銀河の候補として分類した^{4), 5)}。

表 1 : 電波ローブの膨張速度から年齢が見積もられている GPS 電波源

天体名	大きさ (pc)	膨張速度 (光速単位)	年齢 (年)	出典
0108+388	$22.2h^{-1}$	$0.197 \pm 0.036h^{-1}c$	367 ± 48	9)
0710+439	$86.8h^{-1}$	$0.251 \pm 0.029h^{-1}c$	1100 ± 100	10)
2352+495	$118h^{-1}$	$0.202 \pm 0.026h^{-1}c$	1900 ± 250	11)
2021+614	$16h^{-1}$	$0.12h^{-1}c$	375	12)

具体的にはスペクトル指数¹が $\alpha < -0.5$ で、広がり 15 kpc 以下のもの、として定義している。

CSS 電波源を調べている中で面白いことに気付いた人がいる。右下がりスペクトルの低周波側をたどっていくと、あるところで頭打ちになってより低周波では右上がりになるのだが、この頭打ちの周波数と電波源の大きさとの間に相関があるのだ。すなわち、頭打ちの周波数が高いほど大きさが小さい^{4), 6)}。すると、頭打ちの周波数がより高い電波源を探せばより小さくて若い電波銀河が見つかるだろう、ということで捜査が楽になった。片端から干渉計で電波写真を撮ってサイズを測るよりは、スペクトルをまず単一望遠鏡で測定してから候補を絞ったほうが効率的だからだ。このようにして、頭打ちの周波数が 1 GHz 以上と高くサイズが 1 kpc 以下と CSS の中でもより小さな天体を GHz-Peaked Spectrum (GHz 帯に頭打ち周波数を持つ: 略して GPS) 電波源と分類するようになった^{7), 8)}。

GPS 電波源の面白いところは、サイズが通常の電波銀河の $10^{-6} - 10^{-3}$ 倍と極めて小さいにもかかわらず中心核と双方向の電波ローブという基本形を保っていることだ。最近の VLBI 観測によって電波ローブが時間とともに広がっていく様子がわかるようになってきた。この広がる速さで大きさを割り算すると年齢の指標が得られるが、表 1 に示すよ

うに数百年から数千年という驚くべき若さだ。

ところでスペクトルが頭打ちになる理由は何であろうか。従来はシンクロトロン自己吸収によるものと考えられていた¹³⁾。これはシンクロトロン放射をしているプラズマ自身が光学的に厚くなる現象で、放射場のエネルギー密度 (輝度温度 T_B で記述できる) と磁場のエネルギー密度が十分に高い状態で起こる。ところが、冒頭の VSOP 観測で見つけた OQ 208 の非対称性は、シンクロトロン自己吸収では説明がつかない現象なのだ。

3. VSOP で見つけたプラズマの繭¹⁴⁾

OQ 208 は実は GPS 電波源の中でも特に小さいもので、比較的よく調べられている天体である。7 ミリ秒角離れた北東と南西二つの成分は、15 GHz では 9 倍、8GHz では 12 倍、5 GHz では 11 倍、2.3 GHz では 28 倍、そして 1.7 GHz で 60 倍という明るさの比だ。周波数が低くなるほど非対称になる!? 逆のケース、つまり高周波ほど非対称になる電波源はよく知られている。キューサーや BL Lac 天体などの、明るい中心核と相対論的エネルギーのジェットをもつ天体では、中心核は高周波ほど明るくなるのに対してジェットは暗くなるので、高周波ほど非対称になる。しかし OQ 208 では二つの電波ローブが非対称なのである。

二つの成分の明るさを測って、他の周波数と比較してみたのが図 2 に示したスペクトルである。どちらの成分も凸型で、ピークより高い周波数で

¹ フラックス密度 S が周波数 ν のべき乗 $S \propto \nu^\alpha$ で表せるときの指数 α

は右下がりのスペクトル ($\alpha = -1.1$) を示している。これは電波ロープに典型的なもので、全フラックス密度がほとんど変動しないこともこの二つが電波ロープであることを示している。一方、ピークより低い周波数では急峻な右上がりだ。特に南西成分では $\alpha = 4.1 \pm 0.3$ で、シンクロトロン自己吸収の限界 $\alpha = 2.5$ を越えている。さらに驚いたのは、暗い南西ロープの方が明るい北東ロープよりもピーク周波数が高いことだった。もし低周波側の吸収がシンクロトロン自己吸収なら、ピーク周波数 ν_m (GHz 単位)は

$$\nu_m = 8B^{\frac{1}{2}} S_m^{\frac{2}{3}} \theta^{-\frac{4}{3}} (1+z)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

で与えられるはずだ¹⁵⁾。ここで B は磁場 [G], S_m はピークのフラックス密度 [Jy], θ は成分の大きさ [mas], z は赤方偏移である。北東ロープでは $\nu_m = 2.31 \pm 0.09$ GHz, $S_m = 2.2 \pm 0.2$ Jy, $\theta = 1.7$ mas という観測量を用いると、 $B = 3.3 \pm 1.8$ mG が得られる。それに対して南西ロープでは $\nu_m = 3.45 \pm 0.11$ GHz, $S_m = 0.13 \pm 0.01$ Jy, $\theta = 0.8$ mas により、 $B = 320_{-270}^{+800}$ mG となった。後者のような強い磁場は電波ロープでは考えにくいし、北東ロープとの不均衡が大きすぎる。磁気圧は B^2 に比例するので、 10^4 倍もの磁気圧不均衡を説明することは難しい。要するにシンクロトロン自己吸収だけで低周波側の吸収を説明するには無理があるのだ。

もう一つの吸収機構として、自由-自由吸収を考えたらどうであろうか。自由-自由吸収は放射源の手前にある低温・高密度のプラズマによっておこる現象で、光学的深さは

$$\tau = \tau_f \nu^{-2.1} \quad (2)$$

と低周波ほど強い吸収を起こす。ここで係数 τ_f は

$$\tau_f \propto \int_{\text{視線}} n_e^2 T_e^{-\frac{3}{2}} dL \quad (3)$$

で与えられるので、低温・高密度プラズマを探る指標となる。簡単のために温度・密度共に一様なプラズマ中を通過してくる電波を考えると、プラズマ中の経路 L を使って $\tau \propto \nu^{-2.1} n_e^2 T_e^{-\frac{3}{2}} L$ となる。経路が長いほど吸収が強く効くので、より高い周波数まで吸収されてしまうのである。放射源のスペクトルが $S_\nu \propto \nu^\alpha$ というシンクロトロン放射であった場合、観測される吸収を受けたスペクトルは

$$S_\nu \propto \nu^\alpha \exp(-\tau_f \nu^{-2.1}) \quad (4)$$

で与えられる。低い周波数ほど選択的に吸収されるため、本来のスペクトルと異なるものが観測されるわけだ。

たとえて言うなら、陽が高いときには太陽の色は真のそれを反映しているが、夕陽は大気中で波長選択的に起こる吸収(および散乱)が強く効き赤くなる、という現象に似ている。もちろん OQ 208 では吸収体は地球の大気ではなく、電波源近傍に存在している。可視光では吸収によって赤くなるが、電波では低周波ほど吸収されて「青く」なるのだ…ということをやったら、宇宙研の伊予本直子に「X

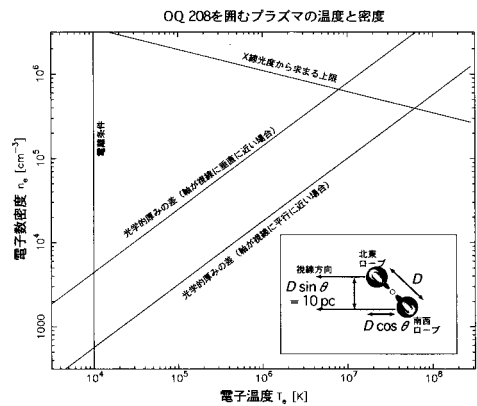


図3 : OQ 208 の周りを取巻くプラズマの温度と密度。囲みは OQ 208 の電波ロープの周りをプラズマが取巻いている様子。南西ロープのほうが奥にあるため自由-自由吸収がより強く効くと解釈できる。吸収係数の差から、プラズマの温度と密度に対して制約条件をつけられ、青い台形で示した範囲にあると求められる。

線でもそうだ」という指摘をいただいた。

図 1 の実線は自由-自由吸収モデルによるスペクトル、破線はシンクロトロン自己吸収モデルを表したものだ。北東ローブはどちらのモデルでも説明できるが、南西ローブでは自由-自由吸収モデルのほうがよく合う。フィットで得られた τ_f を比べると、南西側は $\tau_f = 11.7 \pm 4.6$ で、北東側の $\tau_f = 6.4 \pm 0.4$ の約 2 倍を示す。暗い南西ローブの方向でプラズマ中の経路が長いためにピーク周波数が高くなっているものとして理解できる。経路の差は図 3 で示すようにローブを結ぶ軸が視線に対して傾いていることによるものと考えるのが単純で、ローブ間の見かけの距離 10 pc 程度の経路差があると思うと、 $0.043 < T_e^3 n_e^{-2} < 2.6$ という制限がつけられる。これに、電離するための条件 $T_e > 10^4 \text{K}$ と、X 線光度の上限 $L_X = 7.3 \times 10^{20} n_e^2 T_e^{\frac{1}{2}} R^3 < 10^{42} \text{erg s}^{-1}$ を与えると、電子温度は $10^4 < T_e < 6 \times 10^7 \text{K}$ 、密度は $600 < n_e < 7 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$ が得られる(図 3)。パラメーターの不定性が大きいものの、低温・高密度のプラズマが電波ローブを取巻いていることを示せたと考えている。

4. 影絵で見たプラズマ環体¹⁶⁾

OQ 208 のスペクトルは自由-自由吸収で説明できたが、それでは他の GPS 天体ではどうだろうか。また、OQ 208 では自由-自由吸収を起こすプラズマの分布を一様と仮定せざるを得なかったのだが、実際にはどのような空間分布をしているのだろうか。もし全ての GPS で自由-自由吸収が起こっているとすると、電波ローブの成長を考えるうえで抵抗となるので、電波銀河の進化モデルに影響を与えることになる。自由-自由吸収の普遍性を調べる目的で、18 個の GPS 天体をサンプルとして選び出し、VSOP と VLBA を使って 1.6, 2.3, 4.8, 8.4, 15.4 GHz の 5 周波でスペクトルの空間分布を調べるというゼイタクな観測を提案した。この観測は進行中なのだが、

本稿ではその中で最も距離の近い NGC 1052 について得られた結果を紹介する。NGC 1052 は赤方偏移 $z = 0.0049$ (ハッブル定数を $75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ とすると距離約 20 Mpc) にある巨大楕円銀河で、中心に強い電波源があり、東西両方向にジェットを噴き出している^{17), 18)}。この天体では $1 \text{ mas} = 0.1 \text{ pc}$ と高い空間分解能が得られるので、自由-自由吸収プラズマの空間分布を調べるのに最適な天体だ。特に、両方向のジェットが検出できているので遠ざかる奥側のジェットを背景にプラズマの分布を「影絵」として知ることができるのが嬉しい。

観測は VLBA を使って 1998 年 12 月に周波数 2.3, 8.4, 15.4 GHz で行った。図 4 に各周波数で得られた電波写真を、図 5 (=表紙) には 2.3 GHz を赤、8.4 GHz を緑、15.4 GHz を青に割当てたカラー写真を示す。

さて影絵の手法を用いるに当たっては、その骨格となるジェットの軸を知る必要がある。どこが「原点」つまり中心核であるかも決めなくてはならない。多くの活動銀河核では、中心核はジェット

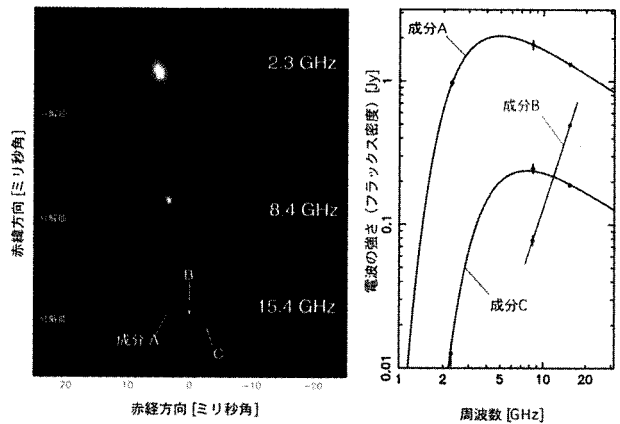


図 4 : 左: GPS 電波源 NGC 1052 の 3 周波での電波写真。成分 B が中心核で、東西両方向にジェットが吹き出ている。15.4 GHz では比較的対称性がよいが、周波数が低くなるほど非対称になる様子がわかる。右: 各成分のスペクトル。成分 A と C の実線は自由-自由吸収モデルでフィットしたもの。C のほうが吸収が強く効いていて、頭打ち周波数が高くなっている。成分 B はさらに吸収が強く、2.3 GHz では検出できなかった(上限値は 5.6 mJy)。

より小さな分解できない「点源」で、ジェット成分に比べると高い周波数でも強い電波放射をしているので、サイズに対する電波の強さ（即ち輝度温度）とスペクトルを調べることによって中心核が同定できるであろう。NGC 1052 ではジェットの成分が見かけ上 1.3 mas yr^{-1} で運動していることがわかっていて¹⁹⁾、異なる時期の観測を比較してスペクトルを導出するのは危険であり、ここで3周波同時観測が威力を発揮する。まず、どの周波数でも独立した成分として確認できるAとCを同定した。この二つはどの周波数でも約8mas離れているので、重ね合わせの参照点とした。15.4GHzと8.4GHzではAとCの間に成分Bが確認できるが、2.3GHzでは検出限界以下である。各成分のフラックス密度を求めてスペクトルにしたのが図4である。AとCは8.4GHzより高い周波数で右下がりのスペクトルを示すのに対して、Bはスペクトル指数が $\alpha = 3.0$ と鋭く右上がりである。より周波数の高いミリ波ではBが最も明るい成分となることであろう。このスペクトルからも、2.3GHzでBが検出できない($< 5.6 \text{ mJy}$)ことも納得できる。また、輝度温度は成分Aが $(2.32 \pm 0.04) \times 10^9 \text{ K}$ 、Bが $(0.97 \pm 0.02) \times 10^9 \text{ K}$ 、Cが下限値で $1.48 \times 10^{10} \text{ K}$ であった。上記の考察から、輝度温度が最も高いBが中心核であると考えられる。

ではジェットの幾何を考えてみよう。大前提として、近づくジェットも遠ざかるジェットも同じ明るさ・速さを持つと仮定する。見かけの明るさの違いは、相対論的ビーミング効果に帰着させるのである。15.4GHzでは成分A・Cともに光学的に薄いスペクトルを示すから、自由-自由吸収の影響はここでは無視する。近づく成分Aの輝度温度 T_b^+ と遠ざかるCのそれ T_b^- の比 R は

$$R = \frac{T_b^+}{T_b^-} = \left(\frac{1 + \beta \cos \theta}{1 - \beta \cos \theta} \right)^{2-\alpha_0} \quad (5)$$

で与えられる。ここで β はジェットの実際速度を光速単位で表したもの、 θ はジェットが視線とな

す角である。 α_0 はジェットのスペクトル指数で、スペクトルフィットから求めた $\alpha_0 = -0.65$ を採用する。測定結果 $R = 2.4 \pm 0.1$ を用いると、 $\beta \cos \theta = 0.16 \pm 0.01$ が得られた。 β と θ を分離するにはAとCの間の見かけの速度 1.3 mas yr^{-1} を利用する。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_{app}^- は、

$$\beta_{\text{app}}^{\pm} = \frac{\beta \sin \theta}{1 \mp \beta \cos \theta} \quad (\text{複合同順}) \quad (6)$$

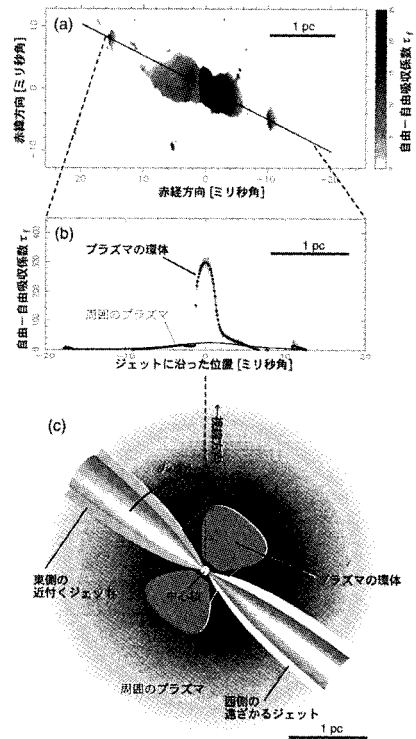


図6：(a) 自由-自由吸収係数 τ_f の空間分布。この量は $n_e^2 T_e^{-\frac{3}{2}} L$ に比例する。(b) ジェットに沿って τ_f の値を表示したもの。中心核で最大となり、西側の遠ざかるジェット方向に裾野をひいている一方で、東側の近づくジェット方向では急激に吸収量が減少する。(c) 吸収係数の空間分布をもとに推測したNGC 1052の構造。ジェットは視線に対して 50° 傾いていて、それに垂直な環体状のプラズマが強い自由-自由吸収の起源となっている。さらに外側には等温Kingモデルの密度分布で説明できるプラズマが取り巻いている。

となる。これに測定結果 $\beta_{app} = \beta_{app}^+ + \beta_{app}^- = 0.40$ を適用すると、 $\beta = 0.25$ および $\theta = 50^\circ$ を得る。これで、構造を考える際の「大黒柱」というべきジェットの様子が求まった。

いよいよ吸収量の分布を見てみよう。電波写真各ピクセル毎の 3 周波のフラックス密度に対して、自由-自由吸収のスペクトル (式 4) をモデルフィットして τ_f を求めた結果が図 6 a である。さらにジェット軸 (位置角 65°) に沿って τ_f の値をプロットした。この結果からわかるように、 τ_f は中心核の位置 (図 6 b の原点) で 300 という大きな値を示し (周波数 1 GHz で光学的厚みが 300!), 遠ざかる西側のジェット方向に裾野をひいているのに対して、近づく東側ジェットでは急激に値が下がっている。 τ_f は自由-自由吸収プラズマ内を視線が通過する長さの指標となることに注意して、このような分布を考えてみよう。まず東側ジェット方向 0.1 pc での不連続性は、何らかの境界面が存在することを示す。西側ジェット方向約 0.7 pc に渡って τ_f が裾野をひく様子から、吸収体が 0.7 pc の範囲に局在していることがわかる。さらに、遠ざかるジェットは覆い隠すものの近づくジェットは隠さないことから、吸収体がジェット軸の赤道面に集中していることが示唆される。このような考察に、吸収体の分布がジェット軸に対して回転対称であるという仮定を導入すると、図 6 c に示したような環体状のプラズマの分布を考えるのが自然であろう。

さらに、中心から 0.7 pc 以上離れた場所でも吸収係数は有意で、外側に向かってなだらかに減少していく成分がある。この成分が周囲をとりまくプラズマが等温 King モデル²⁰⁾に従った密度分布

$$n_e = n_0 \left[1 + \left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right]^{-1.5} \quad (7)$$

をしていると考えてフィットしたのが図 6 b の青い曲線である。フィットの結果は電子温度 T_e に依存するが、中心での電子密度 n_0 は $n_0 = (1.00 \pm 0.03) \times 10^4 (T_e/10^4 \text{ K})^{3/4} \text{ cm}^{-3}$ 、コア半径は $r_c =$

0.84 \pm 0.02 pc と求まった。回転で支えられていると考えられる環体状のプラズマの周囲に、熱的に支えられている等温 King モデルで説明できるプラズマが共存していることは興味深く、中心核への質量降着の現場を見ているものと考えられる。

5. まとめ

本稿で述べた結果にはまだ多くの課題が残されている。上記ではスペクトル測定点数が少ないためにシンクロトロン自己吸収を無視し、かつスペクトル指数 α_0 を一定として議論を行ったが、厳密には電波ローブ・ジェット・中心核の各成分ごとに異なっていること考慮する必要があるだろう。それにはより多周波で精度の高い VLBI 観測が求められる。

また、吸収体の分布をより細かく調べれば、温度や密度の「ムラ」が見えてくると期待できる。拡がろうとする電波ローブと閉じこめようとする周囲のプラズマが衝突している現場の様子が見えると、電波銀河の進化モデルに影響を与えるであろう。これは次世代の宇宙空間 VLBI の課題である。

中心核近傍のプラズマ環体をさらに細かく調べれば、降着円盤への質量供給の様子を知る手がかりになるかも知れない。

この研究は、VLBI で熱的な世界を見ようという挑戦でもある。VLBI は高い空間分解能が得られる一方で低い感度が弱点であるため、「熱的な世界が見えない装置なんて意味がない」という悪口をししば浴びる。熱的な放射を検出するのが困難であるのは事実だが、この悪口は二つの点で誤っている。一つは、シンクロトロンやメーザーなどの非熱的放射を観測することによって、独自性の高い業績をあげている点。もう一つは、自由-自由吸収や吸収線を用いた「影絵の天文学」によって、熱的な世界も見えることだ。しかも中性水素原子 HI や水酸基 OH などの吸収線を用いた VLBI 観測はガスの速度場をも調べられることが、澤田-佐藤聡子²⁰⁾、萩原喜昭²²⁾をはじめとする先駆的な仕事などで示されている。もちろん背景に明るい輝度を持つ放射

がある場合に制限されるが、自然がそのような条件を提供してくれているのを見逃す手はない。足りないのは感度だけでなく、むしろ研究者の創意工夫ではないだろうか。せっかくつくった望遠鏡なのだから、性能を限界まで引きだして活動銀河の謎にせまりたいと考える所存である。

謝 辞

VSOP は宇宙科学研究所を中心に世界中の電波天文台が協力して築いた計画です。本研究は VSOP 観測の結果をきっかけにしたものですので、VSOP 計画を支える全ての人に感謝します。VLBA は NRAO が運用している電波干渉計で、NGC 1052 等の観測時間を提供していただきました。電波のフラックス密度を較正するに当たっては、ミシガン州立大電波天文台 (UMRAO) のデータベースを使用しました。共に、お礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 平林 久, 2000, 『天文月報』 93, 182
- 2) Stanghellini C., Bondi M., Dallacasa D., O'Dea C. P., Baum S.A., Fanti R., Fanti C., 1997, A&A 318, 376
- 3) Phillips R.B., Mutel R.L., 1982, A&A 106, 21
- 4) Fanti R., Fanti C., Schilizzi R.T., Spencer R.E., Nan R., Parma P., van Breugel W.J.M., Venturi T., 1990, A&A 231, 333
- 5) Fanti C., Fanti R., Dallacasa D., Schilizzi R.T., Spencer R.E., Stanghellini C., 1995, A&A 302, 317
- 6) O'Dea C.P., Baum S.A., 1997, AJ 113, 148
- 7) O'Dea C.P., Baum S.A., Stanghellini C., 1991, ApJ 380, 66
- 8) O'Dea C.P., 1998, PASP 110, 493
- 9) Owsianik I., Conway J.E., Polatidis A.G., 1998, A&A 336, L37
- 10) Owsianik I., Conway J.E., 1998, A&A 337, 69

- 11) Owsianik I., Conway J.E., Polatidis A.G., 1999, NewAR 43, 669
- 12) Tschager W., Schilizzi R.T., R" öttgering H.J. A., Snellen I.A.G., Miley G.K., 2000, A&A 360, 887
- 13) Readhead A.C.S., Taylor G.B., Xu W., Pearson T.J., 1996, ApJ 460, 612
- 14) Kameno S., Horiuchi S., Shen Z.-Q., Inoue M., Kobayashi H., Hirabayashi H., Murata Y., 2000, PASJ 52, 209
- 15) Kellermann K.I., Pauliny-Toth I.I.K., 1981, ARA&A 19, 373
- 16) Kameno S., Sawada-Satoh S., Inoue M., Shen Z.-Q., Wajima K., submitted to ApJ
- 17) Claussen M., Diamond P.J., Braatz J.A., Wilson A.S., Henkel C., 1998, ApJ 500, L129
- 18) Kellermann K.I., Vermeulen R.C., Zensus J.A., Cohen M. H., 1998, AJ 115, 1295
- 19) Kellermann K.I., Vermeulen R.C., Zensus J.A., Cohen M. H., 1999, BAAS 31, 856
- 20) King, I.R., 1972, ApJ 174, L123
- 21) Sawada-Satoh S., Inoue M., Shibata K.M., Kameno S., Migenes V., Nakai N., Diamond P. J., 2000, PASJ 52, 421
- 22) Hagiwara Y., Diamond P.J., Nakai N., Kawabe R., 2000, A&A 360, 49

Radio Astronomy in Silhouette: The Nucleus of Radio Galaxies Revealed via Free-Free Absorption

Seiji KAMENO

VSOP Project, National Astronomical Observatory, Mitaka Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Modern Very-Long-Baseline Interferometers (VLBI) such as the VSOP (VLBI Space Observatory Programme) and the VLBA (VLBA Array) unveiled distributions of cold dense plasma, which was sensed via free-free absorption process, in the parsec-scale vicinity of active galaxies. A VSOP observation of the GHz-Peaked Spectrum (GPS) source OQ 208 shows that the double lobe with a 10-pc separation is enshrouded with a cold dense plasma. At the center of an active galaxy NGC 1052, a 0.7 pc plasma torus is discovered by trichromatic VLBA observations. These results demonstrate significance of the free-free absorption as a probe of evolution and environment of young radio galaxies.