

活動銀河核ジェットのらせん状の磁場

浅田 圭一

〈国立天文台スペース VLBI 推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

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

活動銀河核ジェットの加速、収束の機構はまだ解明されていません。近年、ジェットでの磁場の果たす役割が注目されています。そこで筆者らは、活動銀河核ジェットでの磁場の役割に注目して、ジェットでの3次元磁場構造を推定するために、多波長でのVLBI偏光観測を行いました。解析の結果、らせん状の磁場によると解釈できる観測結果を得ることができました。本稿では、そのいきさつと結果について紹介させていただきます。

1. 活動銀河核ジェット？

活動銀河核は、銀河の光度の 10^{-2} から 10^4 倍もの莫大なエネルギーを、銀河全体の大きさから比べると 10^{12} 分の1以下という、銀河の中心のおそらく1立方光年よりも小さな領域から放出しているという、宇宙規模で見ても、最も激しい活動現象です¹⁾。その莫大なエネルギーの生成は、活動銀河の中心に存在する超巨大ブラックホールに、超巨大ブラックホールを取り巻くように存在する降着円盤から物質が落ちるときの重力エネルギーの一部を解放していることに起因していると考えられています。前世紀末には、銀河の中心に潜む超巨大ブラックホールの間接的証拠^{2)~4)}が次々と見つかっており、現在では、どの銀河の中心にも超巨大ブラックホールは存在しているのではないかと考えられています。質量の降着によって解放されるエネルギーは、かなりの量が可視光やX線といったエネルギーの高い光子として放出され、われわれに活動銀河として観測されますが、その一部は活動銀河核ジェットとして放出されます。本稿はその活動銀河核ジェットに焦点をあてたお話です。

活動銀河核ジェットは、原始星ジェットや激変

星ジェットなどと並び、宇宙のさまざまな階層で見られる宇宙ジェット現象の一つで、その名のとおり、活動銀河の中心核から、対称な2方向に真っすぐに細く収束された形で吹き出している高速のガス流です。その発見は意外と古く、1918年のCurtisによる楕円銀河M 87中の奇妙な真っすぐに伸びる光線の発見にまでさかのぼります(もうじき百年ですね)⁵⁾。活動銀河核ジェットは宇宙ジェット現象の中でも、長さ、速さ共に宇宙最大規模のもので、長いものでは母銀河の広がりをはるかに超え数百万光年に達します。また、速度に関しては、1970年代はじめには、現状1ミリ秒角(1度の3,600分の1のさらに1,000分の1)という驚異的な空間分解能をもつ唯一の観測手段、超長基線電波干渉計(Very Long Baseline Interferometry; VLBI)を用いた観測により、見かけ上、光速よりも速い速度で運動しているものがあるということも明らかになっていました⁶⁾。現代物理学では光速を超えて運動をする物質は認められておらず、発見当時大問題になったらしいのですが(当時、筆者は-4歳)、現在ではジェットが光速に近い速度をもって観測者の方に運動している場合に観測される見かけ上の現象であるという解釈がなされ、共通認識となっています。いずれ

にしてもこの観測事実は、活動銀河核ジェットが光速近く（まれに光速の99%以上）まで加速されることがあることを示しています。しかしながら、発見から80年以上経った今でもジェットをいかに加速するか？いかに収束させるか？という根本的な謎が解明されておらず、謎が謎のまま残されています。

理論的な研究では、活動銀河核ジェットの加速メカニズムや収束メカニズムに対して、さまざまなモデルが提案されています。それらは、例えば降着円盤からの放射による圧力を使ったものだったり、磁場を使ったものだったりします。この分野の研究は今や日本のお家芸と呼ぶにふさわしいものがあり、この辺りのことに関する日本語で書かれた本^{7),8)}も存在するので詳細はそちらを見ていただくこととして、本稿で紹介する研究に深くかかわりのある磁気流体モデル（図1参照）について言及します。磁気流体モデルは活動銀河中心核ジェットの加速機構および収束機構を統一的に説明できるとも魅力的なモデルで、最近ではスーパーコンピューターを用いた大規模シミュレーションにより、盛んに研究がなされています。はじめに、降着円盤（もしくは超巨大ブラックホールそのもの）を貫くような磁場が存在していたとすると、その磁場は降着円盤の回転とともにねじられていき、らせん状の磁場へと姿を変えます。降着円盤の回転により作られたねじれは大局磁場に沿って伝わるのですが、このときに働く磁気圧勾配と、回転する磁場によって振り回されて生ずる磁気遠心力によって、プラズマは磁場に沿った方向に加速されジェットとして吹き出すと考えられています。一方でらせん状の磁場は伝播するときに動的磁気ピンチ効果によって前方の磁場を収束させ、これによりジェットを細く収束させていきます。このメカニズムが本当だとすると、ジェット内にらせん状の磁場が観測されるはずで、そこで筆者らは、ジェット内の3次元磁場構造を観測しようという試みを始めました。

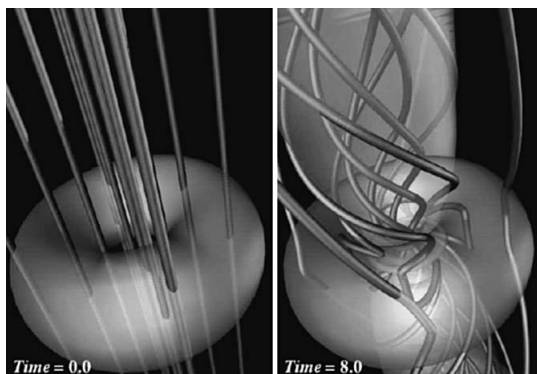


図1 中村らによる磁気流体数値計算。Meierらによる、レビューからの転載¹⁷⁾（左）初期状態では中心天体を囲むように降着円盤が存在し、円盤を貫くように大局磁場が存在している。（右）円盤の回転とともに、磁場がねじられていき、その結果ジェットは放出される。

2. らせん状の磁場を観測しよう!!

太陽では、日本のようこう衛星やNASAのSOHO衛星などのX線衛星によって、磁力線の形状が目に見えてわかるようなどもありリアルな形で観測されています。同様の観測が、われわれからはるか1,000万光年以上も離れた、活動銀河核ジェットにおいてもできればよいのですが、分解能の制限や放射機構の違いにより太陽のようには磁力線を見ることができません。幸い活動銀河核ジェットは、磁場と密接に関係しているシンクロトロン放射（高エネルギー粒子が磁場の周りを旋回運動するとき起こる放射）によって光っています。シンクロトロン放射の場合、光学的に薄い領域では放射の偏光は磁場に対して垂直方向となっているので、偏光成分を抽出することによって磁場の情報を得ることができます。抽出される偏光の方向は天球面に投影されたものなので、天球に投影された磁場の方向分布を知ることができます。過去の研究ではこの方法を用いて、ジェット内の磁場構造が議論されていました⁹⁾。しかしながら、この方法では磁場の視線成分の情報を欠くため、3次元磁場構造を議論するには今一步と

いった結果でした。では天球面に垂直、つまり視線に対して平行な磁場の成分は、どのようにすれば推定できるのでしょうか？ 一つにはファラデー回転量度を用いる方法があります。ファラデー回転は、磁場を含んだプラズマ中を電磁波が伝播するとき偏光の方向（偏光ベクトル）が回転してしまうという現象で、その偏光のベクトルの回転量 ($\Delta\phi$) は“視線に平行な磁場の強さと電子密度の積を視線に対して積分した量（回転量度： RM ）” \times 観測波長 (λ) の2乗 ($\Delta\phi = RM\lambda^2$) で表されます。回転量は観測波長の2乗に比例するので、多波長で偏光観測を行うことによって回転量度を見積もることができ、何らかの磁場の視線成分の情報を引き出すことができます。このようにして求めた二つの観測結果を組み合わせることによって、より有効に、活動銀河核ジェット M 87 の3次元磁場構造を推定することができるのです。

3. 観測させてもらえない

こういった目的で筆者らはアメリカの国立電波天文台が運営する VLBI 専用装置である VLBA (Very Long Baseline Array) や日本の宇宙空間 VLBI の VSOP (VLBI Space Observatory Programme)¹⁰⁾ に何度も何度も観測提案をし続けてきました。しかしながら、VLBA や VSOP からの観測提案に対するレフリーコメントは観測意義には肯定的でしたが、実際の観測の成否には、観測の難易度が高いために否定的な内容でした。今考えると、今まで何の実績もない新参加者が、その当時世界的に見てもあまり例のない VLBI を用いたファラデー回転量度の観測をしたいなんてホントにできるのか？ 観測させて欲しければ、論文の一つでも書いてからにしろといった理由によるものであった気がしています（その証拠に、後にこの記事の内容が PASJ に論文¹¹⁾として受理された後には、一発で追観測のための観測提案やサーベイ観測の観測提案が認められました）。観測提案が受け入れられなかったため、VLBA のアーカイ

ブデータ（他の人によって観測され所定の期日が過ぎ、一般に誰でも触れるようになっている観測データ。VLBA の場合は1年と6カ月）を取り寄せて、その解析から始めることになりました。VLBA から取り寄せたのは、M 87 の VLBA 観測¹²⁾でおなじみのニューメキシコ州立大学の Bill Junor 氏らによる電波銀河 M87 の偏波観測のデータで、較正天体として、キューサー、3C 273、電波銀河 OQ 208、BL Lac 天体 OJ 287 といった天体が同時に観測されており、観測波長は6 cm と 3.4 cm の2周波数のものでした。もちろんその目的は、われわれに最も近い活動銀河核ジェット M 87 の3次元磁場構造を推定することでした。

当時、アーカイブデータとはいえ、世界が注目する結果が出るかもしれないデータを手に入れたので、意気揚々と解析を始めたことを覚えています。しかしながら、データの較正を進めるに従って、その見通しが暗いことを実感していきました。電波銀河 M 87 に付随するジェットにおいて、アメリカの国立電波天文台の干渉計、VLA で見る中心核から数百光年先のスケールでは強く偏光しているにもかかわらず、VLBA で見る数光年スケールでは放射の偏光成分がほとんど検出できないのです。ジェットからの放射の偏光成分が検出できなければ、磁場構造の推定などできるはずもなく、私が解析を間違えているのではないかと、思い、さんざん解析をやりなおしましたが、他の較正天体はしっかりと偏光成分が抽出できていることを踏まえると、徐々に結果が間違っていないと感じ落胆していきました。現在では M 87 については、筆者ら以外のグループが解析した結果からも、数光年スケールでジェットからの放射はほとんど偏光していないということがわかっています¹³⁾。

そんな中、較正天体として解析した 3C 273 のジェット内に特異な現象を見つけました。当時、数光年の活動銀河核ジェットの中において、

キューサーに分類されるものに付随するジェットと、BL Lac に分類されるものに付随するジェットでは、偏光ベクトルの分布がジェットに対して垂直と平行で2分すると言われていました¹⁴⁾。具体的には、キューサーに分類されるものに付随するジェットでは、偏光ベクトルがジェットに垂直なのに対し、BL Lac に分類されるものに付随するジェットでは、平行な分布をしており、このことは、キューサーとBL Lac で投影磁場の方向が平行と垂直で2分するというを示しています。その原因は、ジェット内の衝撃波がBL Lacの方が顕著に見える、磁場の回転成分が見えていた、といった諸説さまざまでした。ところが3C 273 のジェットでは、この辺りはジェットに垂直、この辺りはジェットに平行といった強い特徴もなく、偏光ベクトルの分布が非一様で、しいて挙げれば弓状の曲がった特徴的な偏光ベクトルが観測されました。そして偏光ベクトルの湾曲は、波長 3.4 cm で見るよりも、波長 6 cm で見る方がより顕著でした。観測波長が長いほどこの傾向が顕著であったため、ファラデー回転の影響が強く効いているのかもしれないと思い、これらの観測結果を組み合わせて3C 273 ジェットの回転量度分布を作り上げました。そして得られた回転量度分布は、ジェットの進行方向に対して垂直な方向に勾配をもつという、初めて見るものでした。

4. らせん状の磁場という解釈

得られた回転量度分布を図2に、図2上の線A-Bで切断した回転量度の断面図を図3(a)に示します。回転量度分布はジェットの左岸から右岸(ジェットの upstream, つまり中心核の方から downstream を見て左手が左岸、右手が右岸)にかけて滑らかな傾きがあることがわかりました。また、回転量度分布は検出されたジェットの全域にわたって正の値をもっていることもわかりました。この回転量度分布はらせん状の磁場構造を仮定すると、以下のように上手く説明がつかます。図3(b)にらせ

ん状の磁場をさまざまな視線角で見たときの磁場の視線成分を示します。はじめに、らせん磁場を真横から見た場合について(図中90度の場合)、磁場の視線成分は方位角成分のみとなり、その結果、右岸から左岸にかけて勾配をもち、中心軸に対して点対称な構造になります。なお、符号の正負は磁場がわれわれに近づく向きなのか、遠ざかる向きなのかを表しています。一方でらせん磁場を極方向から眺めると(図中0度の場合)、磁場は軸成分のみとなり、ジェットの右岸、左岸で違いは見られません。ここで、その中間、らせん磁場を斜めから見た場合を考えると(図中30度、45度、60度の場合)、磁場の視線成分は方位角成分と軸成分をある割合で組み合わせた量で表され、右岸から左岸にかけての勾配をある割合で残しつつ、全体が底上げされていくような形となります。また、らせん磁場をらせん磁場の巻きの角度(ピッチ角と言い、ジェットの軸から測った角度)よりも小さい角度で見込むと、磁場の軸成分の向きに依存して、視線成分は正負いずれかの符号のみもつこととなります。3C 273 の場合、観測された回転量度分布に勾配があり、すべて正の値となっていることを考えると、らせん磁場を斜めの角度からとらえており、見込む角度はピッチ角よりも小さいと考えるとうまく説明がつかます。一方で、超光速現象の観測事実から、3C 273 のジェットと視線のなす角度が16度以下であるということがわかっています。つまり、われわれはかなり小さな角度で3C 273 のジェット(らせん磁場)を見込んでいることとなり、上記の描写とうまく一致することが予想されます。

回転量度は、ジェットの右岸よりも左岸の方が値が大きいことから、磁場の方位角成分は紙面に対して反時計回りであることがわかります。また、回転量度分布がジェット全体で正の値を示していることから、磁場の軸成分はわれわれを向いていることがわかります。以上のことを組み合わせると、磁場の旋回方向が同定でき、中心核か

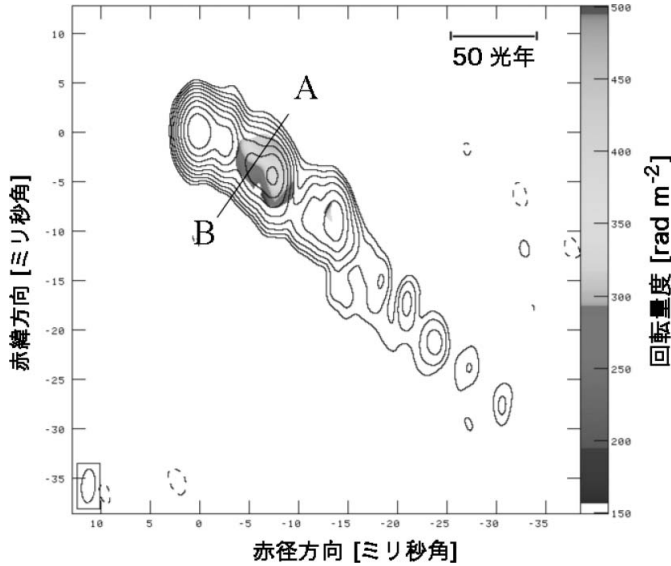


図 2 3C 273 ジェットの輝度分布 (等高線) と回転量度分布 (グレースケール). 等高線は信号対ノイズ比が 3×2^n ($n=1, 2, \dots$) で引いてある. 中心核は北東の端に位置し, 南西に向けてジェットが吹き出している. この方向は数百光年スケールで見えるジェットの方向とほぼ一致している. 回転量度はジェットの右岸から左岸へ勾配があり, ジェット全体にわたって正の値をもっている.

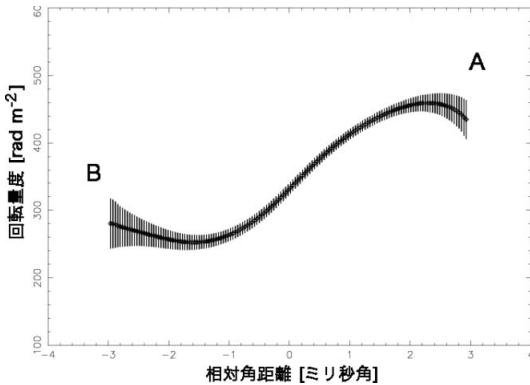


図 3(a) 図 2 中の線 A-B に沿った線での回転量度分布の断面図. A がジェット左岸側, B がジェット右岸側. 黒の曲線が観測値を表し, 灰色の縦線が観測の誤差を表す. ジェットの右岸から左岸にかけて, 有意な回転量度の勾配が存在する.

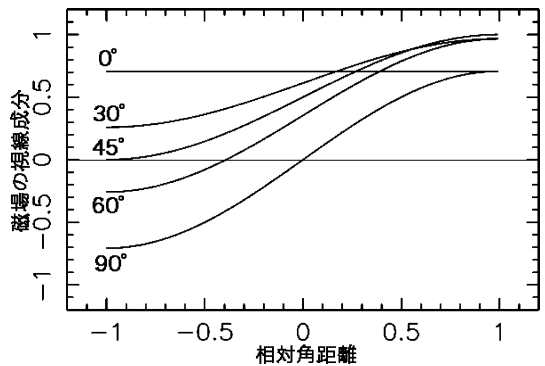


図 3(b) いろいろな角度から見たらせん状の磁場の視線成分. 横軸はジェットを横断する方向への相対角距離. 縦軸の磁場の視線成分は磁場の強度で規格化してある. また, らせんのピッチ角は 45° を仮定している. 90° の線がらせん磁場を真横から見たときに相当し, 0° の線がらせん磁場を真上から見たときに相当する. 真横から見たときには磁場の視線成分がジェットに対して点対称となり, 真上から見たときは常に同じ値をもっている. 視線角がらせんのピッチ角 (この場合は 45°) よりも小さくなると, 磁場の視線成分は常に同一の符号をもつようになる.

ら見て右ねじの方向にねじれていると考えることができます。さらに、この磁場のねじれの向きが、ジェット磁気流体モデルに起因しているのならば、このねじれは降着円盤によって生成されたものであるため、旋回の向きから降着円盤（もしくは超巨大ブラックホールそのもの）の回転の向きが推定でき、それは紙面に対して時計回りになっているということがわかります。この結果は、磁気流体モデルという仮定のみで、まだ分解能不足で観測的には見えない内側の構造を、外側の構造を使って探査できる可能性があることを示唆した結果であるとも言えます。

5. わかったこと、残ったこと

先述のように、回転量度＝“視線に平行な磁場の強さと電子密度の積を視線に対して積分した量”で、ただ単に回転量度＝“視線に平行な磁場の強さ”というわけではありません。観測事実はジェットの右岸から左岸にかけて、回転量度の勾配が存在するというので、らせん状の磁場というのは魅力的な解釈の一つです。また、われわれとジェットの間には、われわれの銀河系内の星間プラズマや、3C 273の母銀河の星間プラズマ、狭輝線領域に付随するプラズマなど、さまざまなプラズマが宇宙には漂っている可能性があり、これらのプラズマがたまたまジェットの片側だけ覆っていた場合にもこの勾配は観測されるかもしれません。実際、現状では、この可能性を完全に棄却するには至っていません。また、3C 273は全天で、最も明るいジェットの一つですが、活動銀河核ジェットの中でもとりわけ近いというわけではありません。つまり、3C 273は遠いけどめっちゃ明るい、とても異常な天体であるということになります。筆者らが見つけた回転量度の勾配も、ひょっとすると異常な天体の異常現象の結果なのかもしれません（それはそれで面白いのですが）。これらの未解決問題を解決する糸口はサーベイ観測にあると思います。仮に、ジェットが磁

気流体モデルの様な加速、収束機構で生成されているとするならば、他のどのジェットにおいてもらせん状の磁場が観測されるはずですが、一方で、他のすべてのジェットにおいてジェットとは何の関係もないプラズマ雲がいつもジェットの片側だけを覆うとは考えづらいことです。地味ですが、一つ一つ間接的な証拠を積み上げていって、いずれ活動銀河核ジェットにはらせん状の磁場は必ず付随するという確固たる証拠に育つのか？ それとも、3C 273の回転量度の勾配という観測事実は偶然の産物だったのか？ に答えが出ればと考えています。最近では筆者らのこの成果がVLBI偏光観測の世界でも注目を集め始めており、VLBI偏光観測の大御所、Denise C. Gabuzdaさんらによって、他の活動銀河核ジェットにおいても、3C 273と同様な回転量度の勾配のある天体が続々と見つかりつつあります¹⁵⁾、3C 273においても、VLBAのお膝元、アメリカ国立電波天文台のBob Zavala氏らによって筆者らとは独立に回転量度の勾配が観測されました¹⁶⁾。筆者らも、彼ら、彼女らに負けじと結果を積み上げるべく、VLBAを用いたサーベイ観測を行い、現在その結果の解析中です。

6. そして、VSOP-2へ

われわれの見たらせん磁場は、まさにジェットの生まれる場所と考えられている、まだ誰も直接見たことのないブラックホールと降着円盤というシステムからは、はるか遠く離れたジェットに付随した現象です。活動銀河核ジェットの発見から約80年、いまだ解決を見ないジェットの生成の謎、その理由は、その発生の現場をいまだに、適切な方法で、実際に撮像できていないからだと思えます。現在、宇宙航空研究開発機構と国立天文台が共同で計画中の次世代スペースVLBI計画のVSOP-2¹⁷⁾ (<http://www.vsop.isas.jaxa.jp/vsop2/>)では、分解能が前人未到の38マイクロ秒角にも達します。これは、活動銀河M 87の距離におい

ては、ブラックホールの影（6倍のシュバルツシルト半径）のサイズの約2倍に相当します。この分解能で観測を行うことができれば、降着円盤と生まれたてのジェットを実際に目で見て確かめるという研究スタイルが可能になるかもしれません。また、VSOPでは搭載されなかった両偏光受信機がVSOP-2では搭載される予定になっており、これにより、本格的な偏光観測が可能になる予定です。VSOP-2を用いた偏光観測を通して、降着円盤と生まれたてのジェットに磁場構造がどうかからんでいるのか？という問題にも直接撮像が力を発揮すると期待されています。

謝 辞

本稿で紹介した活動銀河核ジェットの3次元磁場構造を観測的に推定しようという研究は、井上允教授（国立天文台）、故内田 豊先生（東京理科大）、亀野誠二氏（国立天文台）、藤沢健太氏（山口大学）、井口 聖氏（国立天文台）、武藤睦美さん（NTT）との共同研究です。また、本稿で紹介した研究はアメリカ国立電波天文台のVLBAのアーカイブデータを用いて行われた研究です。観測データの較正の際には、ミシガン大学で行われている、フラックスモニターのデータを使用させていただきました。これらの皆様に深くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 岡崎敦男, 1999, 活動する宇宙—天体活動現象の物理—, 柴田一成, 福江 純, 松元亮治, 嶺重 慎共編 (裳華房), 101
- 2) Ford H. C., et al., 1994, ApJ 435, L27
- 3) Miyoshi M., et al., 1995, Nature 373, 127
- 4) Ghez A. M., et al., 2000, Nature 407, 349
- 5) Curtis H. D., 1918, Pub. Lick Obs. 13, 31
- 6) Cohen M. H., et al., 1971, ApJ 170, 207
- 7) 福江 純, 1999, 活動する宇宙—天体活動現象の物理—, 柴田一成, 福江 純, 松元亮治, 嶺重 慎共編

- (裳華房), 207
- 8) 工藤哲洋, 1999, 活動する宇宙—天体活動現象の物理—, 柴田一成, 福江 純, 松元亮治, 嶺重 慎共編 (裳華房), 241
- 9) Gabuzda D. C., Pushkarev A. B., Cawthorne T. V., 2000, MNRAS 319, 1109
- 10) Hirabayashi H., et al., 1998, Science 281, 1825
- 11) Asada K., et al., 2002, PASJ 54, 39L
- 12) Junor W., Biretta J. A., Livio, M., 1999, Nature 401, 891
- 13) Zavala R. T., Taylor G. B., 2002, ApJ 566, 9L
- 14) Gabuzda D. C., et al., 1989, ApJ 347, 701
- 15) Gabuzda D. C., Murray E., Cronin P., 2004, MNRAS 351, 89L
- 16) Zavala R. T., Taylor, G. B., 2004, Proc. of the VLBA 10th Anniversary Conference for Publication, ed. Romney J., in press
- 17) Murata Y., et al., 2001, Proc. of Asia-Pacific Radio Science Conference AP-RASC '01, p. 251
- 18) Meier D. L., Koide S., Uchida Y., 2001, Science 291, 84

Helical Magnetic Field in AGN Jets

Keiichi ASADA

Space VLBI Project Office, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: In order to reveal 3D structure of a magnetic field in AGN jets, we analyzed archival data observed with VLBA polarimetry towards 3C 273 jet. We found a curious gradient with respect to the jet axis in the distribution of Faraday Rotation Measure. The distribution is well-explained by helical magnetic field, which is related to the formation and collimation mechanism of jets by magnetohydrodynamic models. With assuming MHD model, we can uniquely determine the direction of the disk rotation.