

双極流天体 NGC 2071 及び GL 490

川辺良平*・鷹野敏明*・福井康雄*

1. はじめに

星の一生の最後には超新星爆発という星間空間を飾る一大イベントが用意されているが、星の誕生の前段にも又、光では見ることができないものの、暗黒星雲の世界を驚愕させる一大事変が起きることがわかってきた。それが双極流であり、それを示す天体は双極流天体と呼ばれる。

CO 分子線 ($J=1-0$, 115 GHz) の観測から、数多くの星形成領域で“双極流天体”(Bipolar Flow Objects)が見い出されており、現在その数は 20 近くに達している。双極流 (CO 双極流とも呼ばれる) は、2つの正反対方向に超音速で運動する分子ガスからなる高速ガス流 (High Velocity Flows) であり、莫大な運動エネルギーを持っている (10^{44-47} ergs)。双極流の中心には若い星と思われる赤外線源が位置しており、双極流はその中心天体が林フェイズにいる時期、もしくはその後の表面での対流が強く、星の表面の活動が活発である時期に起こる質量放出や星風に起因するものであると考えられる。双極流天体の中には、電波ジェットのように、流出ガスの形状が、2つの軸方向に細長くのびたジェット状の構造を持つものもある (例 L 1551, NGC 2071)。双極流に関連した物理量は表 1 に示した。

表 1 双極流及びそれに関連した物理量

双極流の質量 (M)	0.3~100 M_{\odot}
速度 (V)	10—150 km s^{-1}
運動エネルギー	10^{44} — 10^{47} ergs
双極流の広がり	0.12~4 pc
力学的時間スケール (τ)	10^3 ~ 10^5 yr
赤外線源の光度	10~10000 L_{\odot}
運動量供給率 (MV)	2×10^{-4} ~ $5 \times 10^{-1} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ km s}^{-1}$

双極流の形成、構造に関して主に次のような問題が重要であろう。(1) ガス流の2軸方向への集中化 (フォーカシング) はどのようなメカニズムで起こるか。(2) 双極流の加速メカニズムはどのようなものか。(3) 双極流のエネルギー供給源は何か。(4) 双極流は、巨大分子雲の乱流エネルギーの十分な供給源になるか。これらの問

題は、分子雲中での星の形成問題や星の進化のプロセスと深く結びついているであろう。

我々は、(1) の問題を解く鍵が中心天体 (赤外線源) の周囲の環境 (半径 $\leq 0.1 \sim 0.3$ pc)、すなわち双極流の広がりより内側の領域にあると考え、赤外線源のまわりの高密度分子雲の微細構造を観測的に調べることにし、観測対象として2つの双極流天体、NGC 2071 と GL 490 を選んだ。この2つを選んだ理由は、(1) Orion KL に次いで総運動エネルギーが大きく、典型的な双極流天体であること、(2) 中心に位置する赤外線源が良く調べられている、(3) 距離が比較的近い、(4) 両者が同じような物理量を持ち、比較が可能である等である。以下で観測結果及び考えられるフォーカシング・メカニズムについて述べてゆくことにする。

2. NGC 2071 及び GL 490 のディスク状高密度分子雲

NGC 2071 及び GL 490 を野辺山 45 m 鏡を用いて CS 分子線 ($J=1-0$, 49 GHz) の観測 (1983 年) を行い、又 NGC 2071 をボン 100 m 鏡を用いて NH_3 分子線 (24 GHz) 観測 (1984 年) を行なった。CS 観測の距離分解能は NGC 2071 で 0.07 pc, GL 490 で 0.13 pc であり、 NH_3 観測の距離分解能は 0.09 pc である。それらの結果をまとめると次のようになる。(1) 赤外線源のまわりに双極流の軸方向と垂直にコンパクトなディスク状高密度分子雲が存在する。(2) その分子雲は、一部は回転しており、一部は膨張している、分子ガスからなるディスクであると解釈することができる。(3) ディスクは高速ガス流の影響を受けて部分的に崩壊中である。これらを以下で詳しく見てゆこう。

(a) NGC 2071

NGC 2071 はオリオン座の馬頭星雲の北東約 5 度に位置する反射星雲で、図 1 (=表紙) のように CO 分子線で典型的な双極流を示す天体である。図 2 は、観測で得られた CS スペクトルを4つの速度領域に分割してそれぞれの速度成分に対応した CS 分子雲の空間分布を示している。CS スペクトルの主成分である $8-12 \text{ km s}^{-1}$ の速度成分の分子雲は双極流の方向に直交する北西-南東方向にやや伸びた構造を示している。この楕円形の分子雲の運動を見るために、長軸に沿った位置を縦軸に、速度を横軸にとった図 (位置-速度図) を作ると、図 3 のようになる。楕円形分子雲にあたる領域で約 $5 \text{ km s}^{-1} \text{ pc}^{-1}$

* 名大理 Ryohei Kawabe, Toshiaki Takano, Yasuo Fukui: Bipolar Flow Objects, NGC 2071 and GL 490

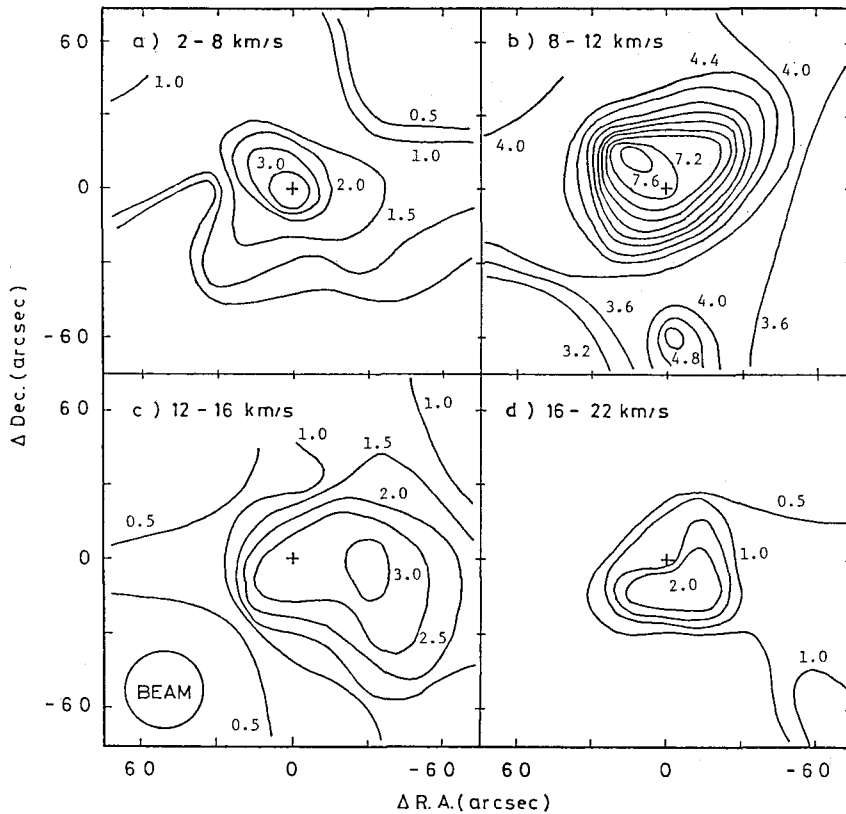


図 2 各速度領域での CS (J=1-0) 線強度の空間分布 (NGC 2071).

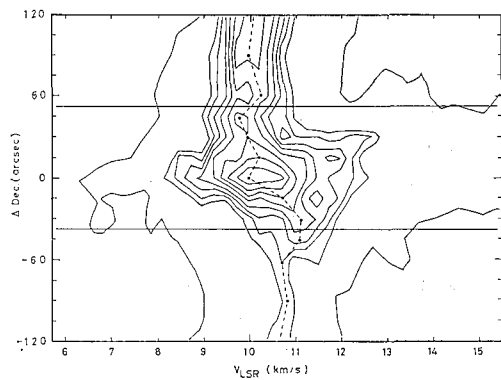


図 3 NGC 2071 の CS ディスク分子雲 (図 2 (b)) の長軸方向での位置速度図。点線は各位置でのスペクトル線のピーク速度をトレースしてある。ディスク分子雲の両端は 2 本の水平線で示されている。

の速度勾配が見られる。このことから、この楕円形分子雲は中心の赤外線源のまわりを回転しているディスク状分子雲であることがわかる。このディスク状分子雲の諸量を表 2 に示す。

さて、双極流に直交する高密度のディスク状分子雲の存在はわかったが、これが球対称ガス流をフォーカシングして双極流を形成することが出来るのだろうか。ま

表 2 ディスク状分子雲の諸量

	NGC 2071	GL 490
半径	0.15 pc	0.15 pc
力学的質量	$20/\sin^2 i (M_{\odot})$	—
水素分子質量 ($M(H_2)$)	5~20 M_{\odot}	30 M_{\odot}
水素分子密度	10^5	10^5
赤外線源のタイプ, 質量	B3, ~10 M_{\odot}	B2, ~10 M_{\odot}
(距離)	~500 pc	~900 pc

(注: i はディスクの視線方向からの傾き角を表す)

た、双極流の影響を受けつつ安定に存在し続けることができるのだろうか。図 2 の (a) 及び (d) はそれぞれ速度的に青方、赤方に偏移した CS 線のウィング成分の分布を示している。これらのウィング成分は、主成分から速度で 10 km s^{-1} 以上離れているので、回転運動からかなりずれた運動をする分子雲の存在を示している。赤外線源に対して、青方偏移成分は北東側に、赤方偏移成分は南西側に分布している。この分布の傾向は CO 双極流と同様であり、又分布がほぼディスク状分子雲の領域内にある。これらのウィング成分はディスク状分子雲内の高密度ガスが双極流もしくは星風と相互作用してい

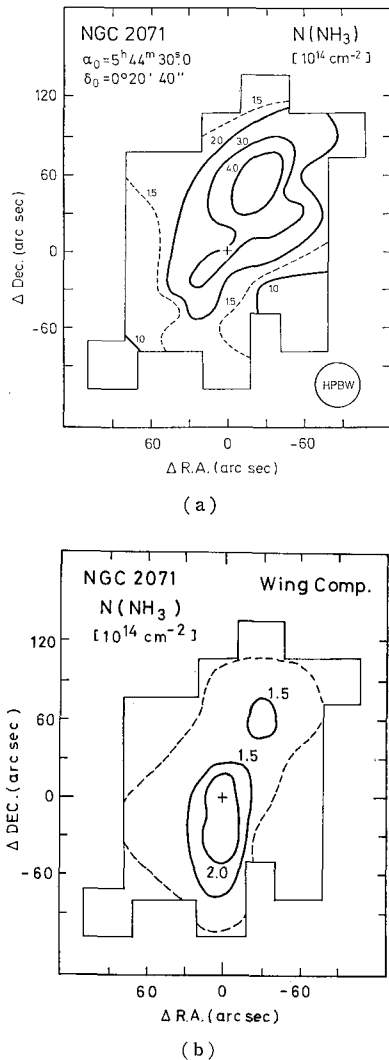


図 4 (a) NGC 2071 のアンモニア分子雲のうち、静かな成分のアンモニア柱密度分布. CO 双極流 (図 1) の方向に直交して北西-南東に伸びた構造をしている.
 (b) 同じくウィング成分のアンモニア柱密度分布. 南側で強くなっており、ディスク状分子雲 (静かな成分) が双極流によって破壊され、吹き飛ばされたと考えられる.

る——おそらくディスクから吹きちぎられて飛ばされている——分子雲を表わしていると考えられる。この成分の外向きの運動量を計算すると $25 M_{\odot} \text{ km s}^{-1}$ となり、CO 双極流の運動量 $150 M_{\odot} \text{ km s}^{-1}$ に比べて小さい。アンモニアの観測はさらに興味深い事実を示している。アンモニアで見たこの領域の分子雲には、強度が $1 \sim 6 \text{ K}$ 、線幅が $\sim 1 \text{ km s}^{-1}$ の比較的静かな雲と、その雲との速度差が $\pm 3 \text{ km s}^{-1}$ に及ぶ、青方及び赤方偏移したウィング成分として見える雲がある。図 4 に、この 2 つの分

子雲の NH_3 柱密度分布を示した。この図から CS の場合と同様に、双極流に直交した分子雲があることがわかる。又、赤外線源の南部では、静かな雲の成分が弱くなって、その代わりに、外向きの運動をする分子雲を表わしていると思われるウィング成分が強くなっている。このことは、赤外線源の南側ではディスク状分子雲は、双極流又は星風との力学的相互作用によって破壊が進んでいることを示している。アンモニアの水素分子に対する存在比を 10^{-7} とすると、静かな雲の質量は $4 M_{\odot}$ 、ウィング成分は $1 M_{\odot}$ となり、この 10^4 年間にディスク状分子雲の約 20% が破壊されてきていることになる。

(b) GL 490 の場合

CS 線の各速度成分での強度分布を図 5 に示した。図 5 (b) に、赤外線源 (+) の周囲に CS 強度が強い細長いコンパクトな分子雲が見られる。図 5 (a), (d) は、それぞれ CS スペクトルの青方、及び赤方偏移したウィング成分の空間分布を示している。これらにも、赤外線源に付随した分子雲が見られる。図 5 (c) に見られる分子雲は、赤外線源に関係しないより広がった分子雲の成分である。赤外線源に付随するそれら CS 分子雲と CO 双極流の分布をかさねると図 6 のようになる。図 5 (b) に見られたコンパクトで細長い分子雲は、双極流方向にほぼ垂直に分布し、双極流の広がりより小さい分布 ($\sim 0.15 \text{ pc} \times 0.3 \text{ pc}$) を持つことがわかる (図 6 (a))。この分子雲は赤外線源のまわりの分子ガスディスクと考えられる。回転の証拠は得られなかった。青方及び赤方偏移した CS ウィング成分の分布も、全体として、双極流方向と垂直方向にのびた構造をもっている (図 6 (b))。それらの成分の分布は、赤外線源を中心に対称になっており、又速度構造は CO 双極流と逆で、例えば CO 双極流の赤方偏移成分が分布する北側に青方偏移した CS ウィング成分が分布している。このことから、CS ウィング成分は、Orion KL 領域で見つかった、IRS 2 を中心とする“膨張ドーナツ”と同様な構造を持つと考えられる。膨張速度は約 5 km s^{-1} である。この分子雲は、大きさも分布も、上で述べたディスク状分子雲とほとんど同じなので、中心の赤外線源からの分子ガス流もしくは星風により加速された、分子ガスディスクの一部であると解釈できる。図 6 (a) のディスク状のコンパクトな CS 分子雲の質量はおおよそ $30 M_{\odot}$ であり、図 6 (b) の膨張成分——膨張リング状分子雲——の質量は $5 M_{\odot}$ である。NGC 2071 の場合と同様に、ディスクの一部は双極流等の影響で崩壊中 (膨張中) であると考えられることができる。ちなみに、他の天体で見つかった分子ガスディスク (又は、膨張ドーナツ) のサイズと質量は、 $3 \times 10^{17} \sim 10^{18} \text{ cm}$, $3 \sim 300 M_{\odot}$ である。

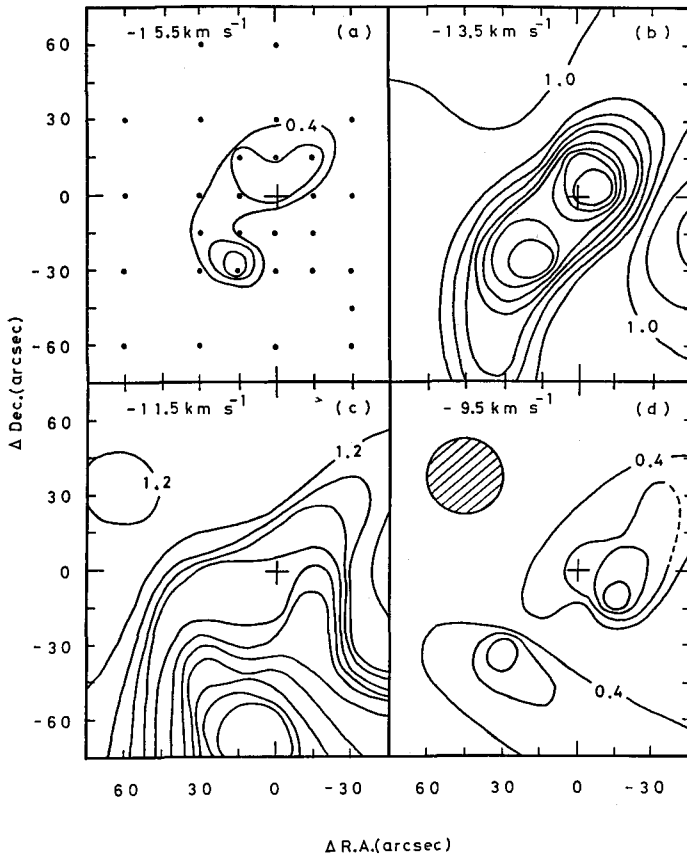


図 5 GL 490 領域での CS 線強度の各速度領域での空間分布図. “+” は中心に位置する赤外線源を表わす.

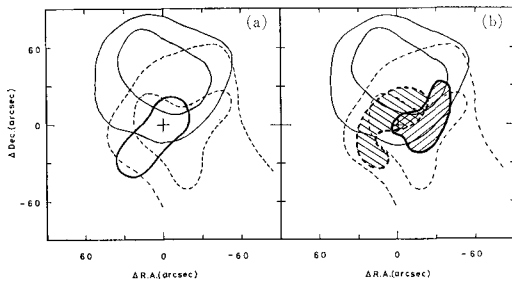


図 6 (a) CO 双極流と CS ディスク状分子雲 (図 5 (b)) の分布. 双極流は実線が赤方偏移成分. (b) CS ウィング成分 (図 5 (a), 図 5 (d)) と CO 双極流の分布 (GL 490).

3. フォーカシング・メカニズム

さて、双極流はどのようなフォーカシングを受けて形成されたのだろうか。大きくわけて、2種類のフォーカシング・メカニズムが考えられる；(1) 中心天体からの球対称なガス流出（又は星風）を、その外周部の高密度ガスの非一様な分布（ディスク状の分布）が、その密度の勾配が大きい2軸方向のみにガス流を通過させる。(2) 中心天体もしくは、そのまわりのガスに付随した磁

場の方向にガス流出が起こる。(1) のメカニズムでは、ディスク状分布の空間的スケールによってさらに3つの場合に分けられる；(a) 中心天体のごく近傍に位置するガスディスク（半径 $\leq 10^{14-16}$ cm）による場合。(b) (a) の場合より大きく、双極流の広がりより小さい分子ガスディスク（半径 $\sim 10^{17-18}$ cm）による場合（坂下等、及び奥田等）。(c) 分子ガスディスクよりもっと大きな板状分子雲（大きさ $\sim 10^{18-19}$ cm）による場合。(a) の場合では、中心の星の重力がディスクに強く働くため、ガス流（星風）の外向きの圧力は質量柱密度の大きい超高密度のガスディスク（ $n(\text{H}_2) \geq 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ）には影響を与えない（このようなガスは、粘性抵抗で角運動量を失って中心へ落ち込んでゆくと考えられる）。しかし(b) の場合では分子ガスディスクに働く星からの重力は、自己重力に比べて小さく、さらに自己重力は、質量が $30 M_{\odot}$ 、半径が 0.1 pc の分子ガスディスクでも $10^{45.5}$ ergs 程度で、双極流の運動エネルギー（ 10^{47} ergs）に比べて小さい。この事は、ディスクは球対称ガス流（又は星風）の影響を受けて壊れてしまうという事を意味している。壊れる途中の状態では、膨張するリング又はディスク状分子雲が観測されることが予想される。実際“膨張ドー

ナッツ”が Orion KL 領域で見つかっている. その外向きの運動量と CO 双極流の運動量はほぼ一致しており, “膨張ドーナツ”が球対称ガス流のディスク方向の運動量のかなりの部分を受けとっている. (c) の場合には, ひょうたん型の高速度ガス流を含むキャビティが形成されるが, ジェットのようにかなり良くフォーカシングされた双極流を形成することは困難のように思われる. ここには, 単純なフォーカシング・メカニズムを挙げたが, この他にも, 磁場をともなうガスディスク中に球対称ガス流との相互作用により形成される, ラバールノズルによりガス流をフォーカシング及び加速しようという一石二鳥のモデル (ケーニゲル) も考えられている.

NGC 2071 及び GL 490 で見いだされたディスク状分子雲はフォーカシングに多少とも寄与しており, この分子雲の内部で (半径 ≤ 0.1 pc) 主にフォーカシングが起っていると考えるのも良いであろう. しかし, Orion KL 領域の“膨張ドーナツ”の場合と少し状況が異なる. つまり, ディスク面内で膨張していると思われる高密度ガスの運動量が, 双極流の運動量に比べてかなり小さく 10 分の 1 程度である (“膨張ドーナツ”の場合は同程度). このことは, 1 つの可能性として, ディスク方向の球対称なガス流を, 分子ガスディスクのもっと内側の構造——星の重力が強い領域に存在するディスク (半径 $\leq 10^{15}$ cm)——が主に受けとめていると考えられることを示している. そのディスクが主にフォーカシングに寄与しているとする, ガス流の影響を受けずに安定に存在するためには, かなりの質量 ($\sim 10 M_{\odot}$, ただし半径 $\sim 3 \times 10^{14}$ cm (20 AU)) を持つ必要がある. しかし観測的にはまだそのような, 質量が中心の星と同程度で非常に小さいディスクの存在は確認されていない.

以上まとめると, (1) 一部は膨張運動を示すディスク状の高密度分子雲の存在は, 分子ガスディスクによるフォーカシングの可能性を強く示唆している, (2) 分子ガスディスクよりさらにコンパクトな星の近傍のディスクによるフォーカシングの可能性も捨てることはできない. 特に, 連続波電波 (ただし熱的成分) で, 双極流と同じ方向にジェット構造 (大きさ $\sim 5 \times 10^{15}$ cm) が見られる L 1551 の場合は (2) が意味を持つように思われる.

4. その他の問題

フォーカシングの問題以外に, 双極流の加速や, エネルギーの供給の問題があるが, その詳しいメカニズムはまだ良くわかっていない. 例えば, 双極流への運動量供給率, $\dot{M}V$, は中心の赤外線源の赤外放射による運動量供給率の上限値 (ただし 1 回散乱の場合), L_{IR}/c , よりかなり大きく, 放射圧による加速では説明がつかない

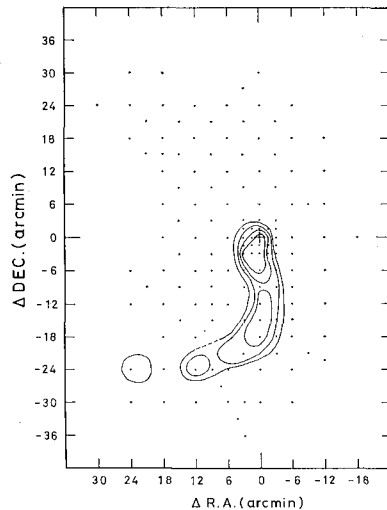


図 7 GL 490 領域の“ジェット”と思われる分子雲. 速度は -21 km s^{-1} で, まわりの分子雲に対して 10 km s^{-1} だけ青方偏移している.

(注: T Tauri 星の星風については, 磁場により駆動される星風モデルが考えられている). 又, 10^4 年間続く双極流の総運動エネルギーは約 10^{47} ergs (GL 490 の場合) で, $L_{IR} = 10^3 L_{\odot}$ の星がその間に放出する輻射エネルギーの 10 分の 1 程度に相当しており, 原始星にガスが落ち込んでゆく時に開放される重力エネルギーや磁場のエネルギーがうまく放出ガスの運動エネルギーに変換されていることになるが, そのメカニズムもよくわかっていない.

5. 追記——GL 490 の“大きな片側ジェット”？——

我々は最近, 名古屋大学 4 m 短ミリ波望遠鏡を用いて GL 490 領域の CO 分子線の観測を行ったところ, 非常に興味深い分子雲を見出した (図 7). この分子雲はちょうど赤外線源 (+) の位置から南に長くのびた構造 ($1.5 \text{ pc} \times 8.0 \text{ pc}$) を持ち, 周囲の分子雲に対して約 10 km s^{-1} 青方偏移している. その分布と速度構造の傾向は, 双極流の青方偏移成分とよく一致しており, この分子雲は, 北側に赤方偏移した相手の成分がないことも考えると, 赤外線源からの“片側ジェット”と解釈できる. この“ジェット”は, 大きさ ($\sim 8 \text{ pc}$), 運動エネルギー ($\sim 5 \times 10^{47}$ ergs), 力学的タイムスケール ($\sim 7 \times 10^5$ 年) を持ち, 他の双極流とはかなり異なった性質を持っている.

今後このような新しい構造の研究や, 又電波 (特にミリ波) 干渉計による高分解 ($\sim 1''$) の観測, スペース Telescope による赤外観測が, 双極流の本質的な問題を解明していくことを期待して本稿の終りとしたい.