

三重構造の特異な分子流天体 ρ Oph-east

水 野 亮*

はじめに

2年ほど前から、名古屋大学の電波天文グループでは星生成領域の無バイアス広域 CO 探査(天文月報 1986年2月号, 福井康雄参照)を行っています。この広域探査は星の生成領域をできるだけ多くピックアップして、星の生成過程を統計的に明らかにすること、特に原始星を探し出し、星生成過程の初期段階を明らかにすることを目的としています。ここで原始星とは、星がまだ降着段階にあり、まわりから降り積もってくる物質の重力エネルギーを解放することによって輝いている天体をさします。このような原始星はまわりに厚い塵のベールをまとっているため、可視光で見えることはできません。ここ5~6年の間に電波、特に分子線の観測により塵のベールの奥深くにある原始星を探ることができるようになりました。

電波による原始星研究の一つのエポックは1980年のスネル(Snell)たちによる双極分子流の発見です。双極分子流は星が生成される時に起きる活動的な現象で、 $10\text{--}100\text{ km s}^{-1}$ の超音速に加速された分子ガスが互いに正反対の2方向に噴き出す現象ですが、この双極分子流の発見によって、星生成が起こっている領域を同定することが可能となりました。それらの成果を踏まえて私たちはCO分子輝線を用いた星生成領域の無バイアス広域探査を始めたのです。

原始星探査のもう一つの重要なエポックは1983年の赤外線天文衛星(IRAS(以後アイラスと記します))の打ち上げです。原始星は温度が低いので、波長の長い遠赤外線の放射が強いと考えられます。しかし、地上から観測できるのは波長の短い近・中赤外線、原始星を見つけるにはあまり適していません。アイラスはほぼ全天にわたって、中・遠赤外線のサーベイ観測を行い、原始星探査のための重要なデータを我々に提供してくれました。しかし、アイラスで検出される赤外線源は若い星だけでなく、銀河や年をとった星なども多く含まれており、そのデータだけで原始星を見つけ出すことはかなり困難です。そこで我々の広域CO探査と組み合わせ、初めて原始星の探査が可能になったのです。

へびつかい座の原始星候補 ρ Oph-east

* 名大理 Akira Mizuno: ρ Oph-east: A Remarkable Multi-lobe Molecular Outflow Source

今回お話しする双極分子流 ρ Oph-east はこの広域 CO 探査によって、「へびつかい座 ρ 星複合雲」と呼ばれる暗黒星雲中に1985年12月に検出したものです。この双極分子流はアリゾナ大学のウォーカー(Walker)たちのグループ、および米国国立天文台のウッテン(Wootten)たちのグループによっても私たちとは独立に検出されました。この天体は以下に述べるような点で、原始星にもっとも近い天体なのではないかと考えられます。

この双極分子流の中心にはアイラスによって赤外線源 IRAS 16293-2422 が検出されています。この赤外線源は全天で最も冷たい赤外スペクトルを持つものの一つで、マンディー(Mundy)たちの観測によってその温度は絶対温度で約40Kと与えられています。またこの赤外線源付近の密度は 10^6 cm^{-3} 以上と非常に高くなっていることが、ウォーカーたちのCS分子の輝線観測から明らかになっています。双極分子流が検出されており、さらに低温で高密度といったことから、 ρ Oph-east は原始星の最も有力な候補の一つと考えられます。ここで、中心星に向かってガスが降着していく運動が観測されれば、原始星にまちがいないし、ということになります。しかし、ガスの降着運動についての確実な観測データはまだ得られていません。ガスの降着が起こっているか否かを調べるためには、非常に高い空間分解能で、光学的に薄い分子の輝線を用いて速度場を丹念に調べることが必要です。

以上のようなことから ρ Oph-east の中心の赤外線源が原始星に最も近い特異な天体であることがわかりただけだと思いますが、そこから噴き出してくる双極分子流もまた特異なものであることが私たちの観測で明らかになりました。

三重構造の分子流天体 ρ Oph-east

ρ Oph-east の特異性は、分子流を形作っている高速度ガスの分布にあります。 ρ Oph-east は2対のコンパクトな双極分子流と1つの広がった単極分子流(一方向だけに超音速の分子ガスが噴き出す現象)の全部で3つの分子流天体から構成されているのです。しかもそれら3つの分子流を駆動していると考えられるのはただ1つの赤外線源です。これまでに複雑な形状をした双極分子流はいくつか見つかっています。しかし、その多くは駆動源と考えられる赤外線源が複数個存在しています。1つの赤外線源から複数個の双極分子流が噴き出している

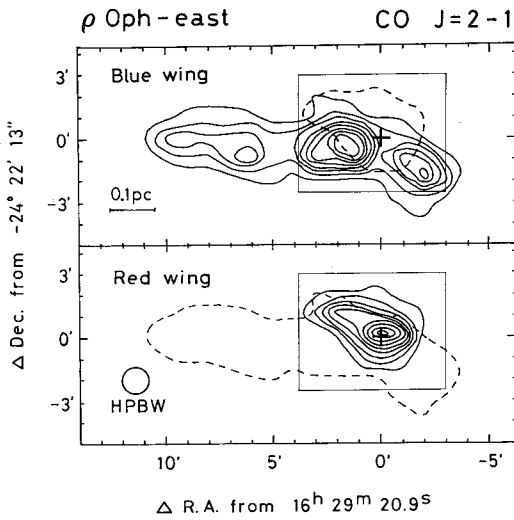


図 1 テキサスの 4.9 m 鏡で得られた分子流天体 ρ Oph-east の一酸化炭素 (CO) 線積分強度図。上段が青方偏移, 下段が赤方偏移を表わす。十字は赤外線源 IRAS 16293-2422。

例としては、これまでに L723 という暗黒星雲中にある双極分子流がゴールドスミス (Goldsmith) 他や林左絵子らによって観測されています。しかし、これも 2 対の双極分子流どまりで、3 つ以上の分子流が 1 つの赤外線源から噴き出しているのはこの ρ Oph-east をおいて他にはありません。

図 1 にテキサスの 4.9 m 電波望遠鏡を用いて、CO の分子輝線で調べた双極分子流の分布を示します。上段は我々に向かって噴き出している青方偏移した高速度ガスの分布を、下段は我々から遠ざかっていく方向に噴き出している赤方偏移した高速度ガスの分布を表わしています。上段と下段を比べると、青方偏移した成分は東西に細長く延びているのに対し、下段の赤方偏移した成分は赤外線源 (図中の十字) 付近に集中しているのがわかります。また、青方偏移した成分は 3 つのピークを持っています。双極分子流では一般に、青方偏移した成分と赤方偏移した成分が赤外線源に対し対称的に分布すると考えられますが、3 つの青方偏移ガスのピークのうち、5' ~ 10' 東のピークには対応する位置の 5' ~ 10' 西に赤方偏移成分が見られません。この青方偏移のピークが ρ Oph-east のひろがった単極分子流です。青方偏移した残りの 2 つのピークは 2 対の双極分子流に対応しているのですが、4.9 m 鏡の分解能では今ひとつはつきりしません。図 2 は、図 1 の赤外線源付近の四角い枠で囲んだ領域を野辺山の 45 m 電波望遠鏡で観測して得られた高速度ガスの分布です。45 m 鏡の高い角分解能でみると、赤外線源に対して対称的に青方・赤方偏移したガスが分布し

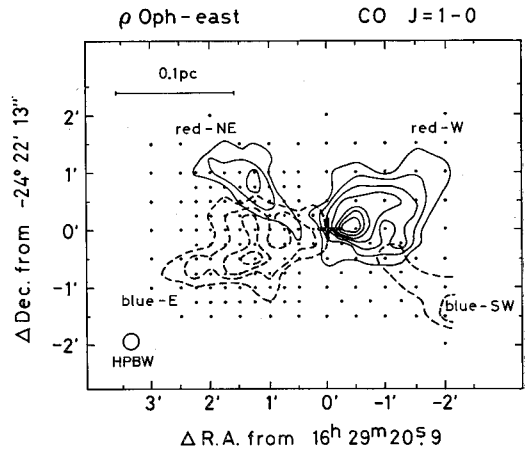


図 2 図 1 の四角い枠内を野辺山の 45 m 鏡で観測して得られた CO 分子流の分布図。実線は赤方偏移, 破線は青方偏移を示す。十字は赤外線源。

ているのがわかります。これで、東西 (blue-E と red-W) 北東-南西 (red-NE と blue-SW) の 2 対のコンパクトな双極分子流があることがおわかりいただけると思います。

3 つの分子流の物理諸量を比べると、2 対のコンパクトな双極分子流はよく似ていることがわかりました。2 対のコンパクトな双極分子流の年齢は 5 千年から 1 万年程度ですが、広がった単極分子流は 10 万年ぐらいと約 1 桁歳をとっています。また分子ガスを噴き出す際のエネルギー放出率も、2 対のコンパクトな双極分子流の方が広がった単極分子流より、1 桁以上大きくなっています。

赤外線源は連星系?

1 つの赤外線源がどのようにして 3 つの分子流天体を駆動しているのでしょうか。2 対のコンパクトな双極分子流は互いに 45 度の角度をなしています。星は回転しながら集まってきたガスや塵の密度の高い円盤の中で生成されると考えられ、原始星のすぐ近傍は軸対称的な構造をしていると考えられます。双極分子流という非等方な高速度ガスの噴出もこの軸対称的な構造の 1 つの現れと考えられますが、 ρ Oph-east の 2 対の双極分子流と 1 つの単極分子流を 1 つの原始星が駆動しているとする、この軸対称性から著しく異なっていることになります。

では、1 つに見える赤外線源が実は内部構造もっていて、複数の原始星から成り立っていると考えたらどうでしょう。マンディーたちは電波干渉計を用い、中心の原始星のまわりの塵粒子の分布を調べました。その結果、赤外線源は、1500 × 800 天文単位の大きさに北北西から南南東の方角に細長く延びており、北北西の先端に

電波強度のピークがあることが明らかになりました。またウッテンたちは同じく電波干渉計を用いてマンディーたちとは異なる波長で電離ガスの分布を調べました。その結果、電離ガスのピークは南南東の端にあり、北北西の塵粒子のピークでは電離ガスからの電波強度は弱くなっています。そこでウッテンたちは、実はこの赤外線源は連星系を成して、北北西にはまだ非常に若い原始星が、南南東にはそれよりも少し進化して温度が高くなった原始星があるのではないかとしています。

干渉計の観測により、分子流の駆動源の赤外線源が内部構造を持っていることが明らかになってきました。では、これによって ρ Oph-east の複雑な分子流の構造はどのように解釈できるのでしょうか。

分子流の形状から考えると、もっとも簡単なのは、赤外線源は実は3つの星からなっていて、それらの一つ一つがそれぞれ2対の双極分子流と1つの単極分子流を駆動しているという考え方でしょう。しかしながらマンディーやウッテンたちの観測で見えている原始星は2つで、3つめの天体は見えません。駆動源が3つというのは、少し考えにくいようです。

では、駆動源が2つだったらどうでしょう。これはマンディーやウッテンたちの観測にはよく合ってきます。しかし、この場合分子流の数は3つなので、2つの分子流を連星系のどちらか一方の星で駆動しなければなりません。私たちは次のような2つのモデルを考えました。

- (1) 1つの駆動源が広がった単極分子流と東西方向の双極分子流を駆動し、もう1つが北東-南西の双極分子流を駆動している。
- (2) 1つの駆動源が歳差運動しながら2つの双極分子流を駆動し、もう1つが広がった単極分子流を駆動している。

(1) は分子流の方向にもとづいて駆動源を考えたモデルで、広がった単極分子流と東西方向の双極分子流の方向がほぼ等しいことからこれらが同一の駆動源によって形成されているのではないかと考えています。しかし、広がった単極分子流のタイムスケールと、コンパクトな双極分子流のタイムスケールは、約1桁異なっています。また分子流のエネルギーや力学的光度も1桁近くコンパクトな双極分子流の方が大きくなっています。そこで、もしこのモデルを採用するならば、 10^5 年前からじわじわと続いていた駆動源の活動が、ここ 10^4 年前ぐらいから急に活発になったと考えなければなりません。これまでに、分子流の活動の時間変化を示唆するような観測はありませんが、理論的に予測されている原始星のフレアアップとか可視光で観測されている「オリオン座FU星」現象など、星生成過程で急に中心星、およびそのすぐ近傍の活動がある時期に急に活発になることも十

分あると考えられます。

(2) のモデルは方向が異なった2対の双極分子流を1つの駆動源で駆動するために歳差運動を考えています。連星系から噴き出す歳差ジェットとしてはX線連星SS 433から出ているX線ジェットが知られていますが、双極分子流で歳差運動が確かめられたものはまだありません。歳差の周期は連星の質量や半径などから計算で求めることができます。分子線や赤外線のデータからこれらの諸量のおおまかな値が推定でき、周期は 4×10^4 年程度と計算されます。一方これとは独立に、2対の双極分子流のタイムスケールと、分子流の軸の回転角を調べることによって、周期を推定することができます。この場合、軸の回転角は視線方向と歳差軸のなす角、歳差の開口角などの不確定性を持っていますが、もっともらしい値をとった時に 2×10^4 年という周期が得られます。これは計算から求めた上記の値の2分の1であり、よく一致していると考えられます。

しかしながらこの歳差モデルにもいくつかの問題点があります。上記計算によれば歳差運動の周期が分子流のタイムスケールとほぼ等しいのですが、もし、歳差運動している間分子流が出続けていると、分子流の形状はS字型になるはずですが、水の出ているホースを手でくるとまわした時を想定してください。しかしながら、 ρ Oph-eastの分子流はS字型よりもむしろX字型に近い格好をしています。これを説明するためには、分子流が断続的に噴き出している、S字が途中で切れていると考えなければなりません。S字が途中で切れているとすると、はじめに出た分子流の後端が後から出た分子流の先端よりも遠くになければならないはずですが、しかし ρ Oph-eastは始めにでたと考えられる北東-南西の双極分子流が赤外線源のすぐ近くまで広がっており、この条件を満たしていません。分子流の高速度ガスがいろいろな速度成分を持っており、遅い速度のガスがまだ赤外線源の近くにとどまっているのだと考えれば、必ずしも上の条件を満たしている必要はありませんが、やや説明としては苦しいところがあります。

現段階では2つのモデルとも、問題をはらんでおり、どちらも決めにくい状況です。しかし、 ρ Oph-eastの複雑な構造は1つの駆動源で形成するのは困難で、連星系の駆動源によって形成されているということは確実であろうと考えられます。また連星系を構成している星は約750天文単位(約 10^{16} cm)しか離れておらず、双極分子流の方向づけはこの大きさ以下のコンパクトなスケールですでに起こっていると考えられます。

分子流とまわりの分子雲との相互作用

双極分子流は大変活動的な現象で、そこから放出され

るエネルギーは $10^{43} \sim 10^{47}$ erg, エネルギー放出率は $0.1 \sim 100$ 太陽光度と大きなものです。そこで, 双極分子流はそれを産みだした母胎である分子雲にも影響を及ぼすのではないかと考えるのは自然なことでしょう。これまでに, 分子流が分子雲の収縮を妨げているエネルギー源なのではないか (天文月 1986 年 11 月号, 福井, 高羽) とか, 分子流によってまわりの分子雲が吹き飛ばされて空洞ができていないか (ゴールドスミス他) などの可能性が示唆されてきました。しかしながら, 分子流がまわりの分子雲に影響をおよぼしている現場を直接捉えた観測例はありませんでした。

私たちは, アンモニア (NH_3) 分子の反転遷移輝線を用い, 分子流のすぐ近傍の密度の高い分子雲の運動を調べました。密度の高いガスの運動や分布を調べる分子線としては, 他に CS や HCO^+ などの分子の回転遷移線がありますが, ρ Oph-east では, これらの分子線は自己吸収を強く受けて, 高密度ガスの分布や運動を正しく知ることができません。それに対し, NH_3 は自己吸収を受けにくく, 高密度ガスの分布を知るのに適しています。 NH_3 の電波強度の分布を図 3 に示します。分子流の駆動源である赤外線源は高密度ガスのコアの端に位置していること, および NH_3 分子線強度が一番強いところ (以後 NH_3 コアと記します) が赤外線源のところではなく, 赤外線源の約 $2'$ 東のところに大きな特徴です。これと分子流の高速度ガスの地図を重ねると, NH_3 コアと東西方向の双極分子流の青方偏移成分のピーク位置がほぼ一致していることに気がつきます (図 4)。また東西方向に NH_3 の速度の変化を調べると, ちょうどこの分子流と NH_3 のピークの位置あたりで速

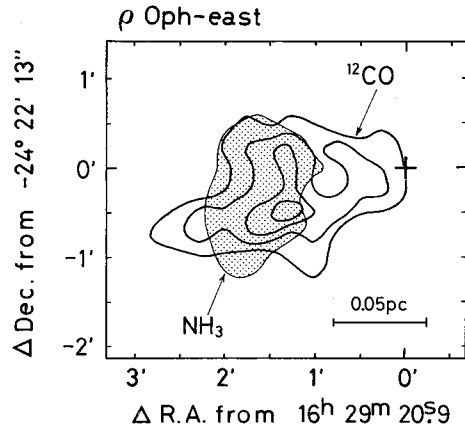


図 4 図 2 の分子流, blue-E の CO 強度分布に, NH_3 コア (影をつけた部分) を重ねたもの。

度が急に分子流と同じ青い方に変化していることがわかりました。私たちは, これこそ分子流がまわりの分子雲にぶつかって, まわりの分子雲を押ししている, 分子流がまわりの分子雲に影響を与えている現場を押えたのではないかと考えました。そのためには, 分子流の持っている運動量が分子雲の速度を観測されている分だけ変化させるに十分な大きさを持っているなければなりません。解析の結果, 分子流の持っている運動量は, 観測された NH_3 の速度変化を生ずるに十分なだけの値であることがわかりました。

では, この NH_3 コアはもともとそこにあったのでしょうか, それとも分子流によって押し集められたガスによってできたのでしょうか。コンパクトな双極分子流のタイムスケールの 10^4 年かかって, 分子雲ガスの速度が観測された速度の変化量である 0.5 km s^{-1} だけ変化すると仮定すると, 分子雲ガスの動いた距離はたったの 0.003 パーセクと, 赤外線源とコアと NH_3 の距離約 0.1 パーセクの 10 分の 1 以下に見積もられます。 NH_3 コアはもともとそこに存在していたのだと考えられます。分子流によってまわりの分子雲の形を変形させるには 10^5 年から 10^6 年の年月を要すると考えられます。この時間は観測されている分子流のタイムスケールの最大値とほぼ等しく, 分子流の寿命にだいたい等しいと考えられています。つまり, ρ Oph-east の分子流によって分子雲の形が変化したのがはっきりとわかるのは, 分子流のフェイズがほぼ終わっているか, 終わりに近い状態になってからだと考えられます。

おわりに

これまでに 4 m 鏡による広域 CO 探査で 20 個以上の双極分子流天体が検出されています。これらの双極分子流はすべて中心にアイラスで検出された赤外線源を伴

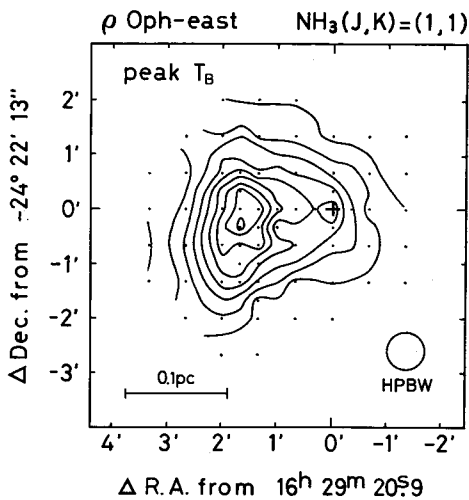


図 3 エフェルスベルク 100 m 鏡で得られた, アンモニア (NH_3) の反転遷移輝線の強度分布。十字は赤外線源

っています。その赤外線スペクトルは温度の低い領域に集中しており、これらもまた ρ Oph-east と同じく原始星の候補であると考えられます。また広域 CO 探査から、温度が低い (~原始星に近い) アイラス赤外線源ほど分子流を伴っている確率が高いことが明らかになりました。(このことに関する詳しい話は岩田氏によってもなく月報で紹介されると思います)。低温ほど分子流を伴う確率が高いということは、双極分子流という現象が星生成のごく初期の原始星の段階で起こることを示しているのかもしれませんが。そして、それは双極分子流という現象が、原始星の降着現象と関わっているということの意味しているのかもしれませんが。しかしながら、現時点では降着が観測的に確認された原始星というのはまだ見つかっておりません。干渉計を用いて、NH₃ のような光学的厚みの薄い分子線で観測すれば、原始星のまわりの降着運動を見つけることができる可能性があります。降着運動を観測的に検出すること、それが原始星探査の第3エポック、ひいては星生成過程の研究の重要なエポックとなるのではないのでしょうか。

お知らせ

山田科学振興財団援助募集

山田科学振興財団から、来日援助・派遣援助についての新しい要項が届きましたのでお知らせします。

援助名	募集開始	締切日
来日 (1989年4月~ 1990年3月分)	1988年4月1日	1988年11月30日
長期間派遣 (1989年4月~ 1990年3月分)	1988年4月1日	1988年11月30日
短期間派遣	出発月の4カ月前の15日が締切日 (例: 1988年10月出発の場合) 1988年6月15日が締切日)	

研究援助候補推薦要領及び推薦書用紙は1988年9月頃届きます。

○募集開始 1988年9月

○推薦期限 1989年3月31日

申込手続き等については、天文学会(0422-31-1359)までお問い合わせ下さい。

天体観測専門誌

天文ガイド

7月号 定価450円千85 6月4日発売!

特集 天体望遠鏡の光軸を合わせる

望遠鏡の実力を出し切るには光軸合わせがポイント。初心者からベテランまでの光軸合わせを解説。

特集 探査機「フォボス」

ソ連、ヨーロッパ、アメリカが協力して7月に打ち上げる火星探査機「フォボス」は何をどう調査?

ニューフェイス・テストレポート

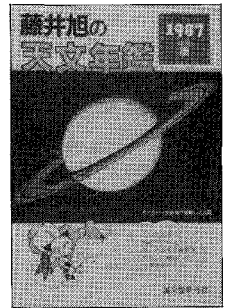
アメリカ、ミード社製の望遠鏡コンピュータ・システムの使用法、利点、欠点を詳細にレポート。

- 7月のスター・ウォッチング ● 7月の観測資料
- 観測ガイド ● 情報ボックス...など情報満載!!

新刊・近刊案内

藤井旭の天文年鑑 1988年度版

初めて星空をながめ、星の名前や星座をおぼえようとする人にもわかる、1988年4月から1989年3月までの天文現象を、くわしく、図を多く入れて解説した、楽しい天文ガイドブックです。



- 藤井 旭 著
- 定価520円千250

切りとる本 天体観測野帖 1988~1990年版

3年間の主な天文現象を観測するための詳しいガイドと観測記録用紙、星図類がついた便利な本。
● 好評発売中! 藤井旭・企画構成 定価780円千250

誠文堂新光社

東京都千代田区神田錦町1-5
電03(292)1221 振替東京7-128