

NMAによる星周圏の観測

柴田 克典*・泉浦 秀行**・辻 隆***
春日 隆*・出口 修至*・浮田 信治*

1. はじめに

ここでは、進化の最終段階にあり、自分が放出したガスを周りにまとった星を対象とした野辺山5素子干渉計(NMA)の観測結果を紹介したい。初期質量が大体 $1M_{\odot}$ から $5-8M_{\odot}$ ぐらいの間にある星は、主系列から巨星分枝、漸近分枝(AGB)段階へと進化し、その後、惑星状星雲の段階をへて白色矮星となり一生を終えると考えられている。このような進化過程をたどる星は、AGB段階に大量の物質を放出する。そして、その外層のほとんどを放出しつくと、収縮を始め、次第に表面の温度が高くなっていく。その結果多量の紫外線を出すことができるようになると、周りのガスを電離し始め、惑星状星雲が出来上がる。AGB星から惑星状星雲への進化は大まかにはこのように考えられているが、具体的な質量放出の様子やその原因となる物理的機構、そして惑星状星雲が示す様々な形態の出来方などはほとんど解っていない。これらの研究を進めていくためには周りに存在する分子ガスの分布や速度構造を詳しく調べることが不可欠である。このような天体のほとんどがシングルデッシュの分解能では分解できない大きさであったので、干渉計の出現は非常に重要な意味を持っている。NMAによって、ミリ波領域での星の分子外層あるいは惑星状星雲の周りの分子ガスの高角度分解能三次元観測が可能になったことにより、AGB星から past-AGB 段階をへて惑星状星雲に至る恒星進化の最終段階を直接観測的に研究する新しい道が開かれたといえる。

2. 炭素星 CIT6 と V Hya

まず、炭素星の観測結果を紹介する。炭素星とは、AGB星の中で酸素に比べて炭素の存在量が多い星のことで、CO輝線が検出されやすい星である。CIT6は活発な質量放出を示し、IRC+10216について明るい赤外炭素星として知られており、星の外層構造の研究を進めるうえで重要な位置を占めている。可視・赤外の偏光観測から、光学的に厚いダスト・トラスとそれに垂直な散乱光を生み出す双極ローブの存在が示唆され、小口径のミリ波望遠鏡による $^{12}\text{CO } J=1-0$ 、 $^{13}\text{CO } J=1-0$ の輝

線輪郭の観測からも同様の構造が外層の分子ガスにも存在することが期待されていた。そこで、 $\text{CO } J=1-0$ 、 $\text{CS } J=1-0$ の干渉計観測が行われ、その構造が調べられた。それによるとCO分子ガスの空間的構造をようやく分解することができ、CIT6のまわりのCO分子ガスの分布はIRC+10216のように丸くなく、視線速度毎に形が不規則に変化していくことがわかった(図1)。しかし、いまのところ回転円盤や双極流のような成分は見つかっていない。一方、CS分子ガスに関しては、十分なS/N比と分解能が得られなかったために、構造を分解できるまでには至らず、北東-南西方向にやや膨らんでいるのがみえる程度にとどまっている。

V Hyaは古典的な炭素星の一つで、NRO 45m鏡を使った観測からCOの輝線輪郭が著しい非対称性を示し空間的および時間的変動を示すことが見いだされ、新しい双極流天体であることがわかってきた。このことは、古典的な炭素星においてすでに双極流天体への初期進化が始まっていることを示す直接的な証拠が得られたことを意味する。NRO 45m鏡によるさらに詳しい観測によってV Hyaは東西方向に伸びたCO分子双極流を有することが明らかにされたが、45m鏡での空間分解能は $17''$ と双極流の具体的な構造を明らかにするには不足で、より高空間分解能での観測が必要であった。そこでNMAによる $\text{CO } J=1-0$ 観測が行われ、双極流の三次元的動力学構造が求められた(図2)。その結果、東西方向に伸びたCO分子双極流が約 $6''$ の角分解能ではっきりと分解され、またこれら双極流が必ずしも対称ではなく複雑な微細構造を持っていることが示された。AGB段階の星でこのような双極流が観測されている例は少な

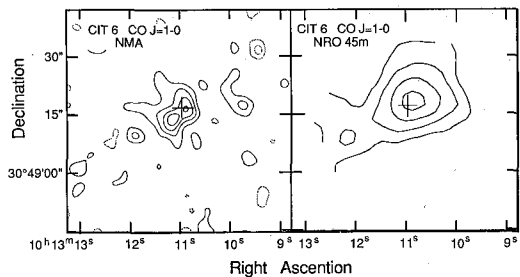


図1 CIT6の $\text{CO } J=1-0$ マップ。左側がNMAによる結果(ビームサイズ $4.73 \times 4.1''$)、右側がNRO 45mによる結果(ビームサイズ $17''$)、速度範囲は $V_{\text{LSR}} = 13.1 \sim 14.7 \text{ km/s}$ である。+印は光赤外で見たCIT6の位置。

* 国立天文台 Katsunori Shibata, Takashi Kasuga, Shuji Deguchi, Nobuharu Ukita, ** 東京学芸大 Hideyuki Izumiura, *** 東大理 Takashi Tsuji: Observations of Circumstellar Envelopes with the NMA

く、極めて急激な短いタイムスケールの現象と考えられている。また、V Hya では変光の様子から連星系の存在が示唆されており、双極流構造の形成は連星系と関連しているのではないかと考えられている。さらに、光学赤外領域のスペクトル観測では $H\alpha$ 、CO などに 120–160 km/s に及ぶ青方変位が見つかっており、高速ジェット流の存在が示されている。これは連星系で形成されたアクリションディスクによるものと考えられる。このように、V Hya は AGB 段階における双極流構造の形成および初期進化を直接観測できる貴重な例であり、さらに詳しい観測が望まれる。

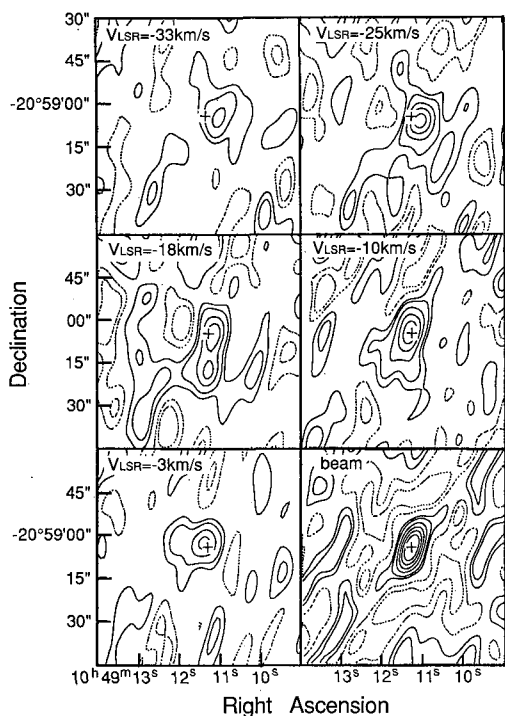


図2 NMAによる炭素星 V Hya の CO $J=1-0$ 各速度成分におけるマップ。東西方向の双極流構造が明瞭に分解されている。

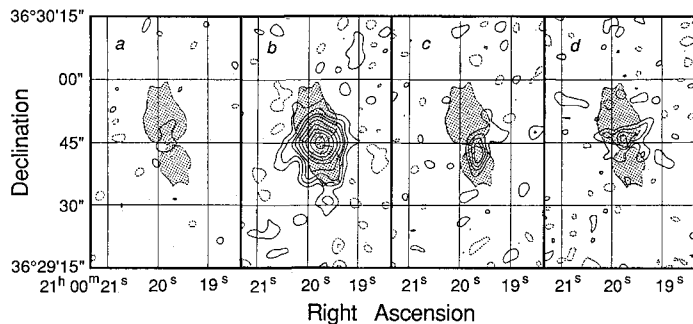


図3 NMAによるCRL 2688のCO $J=1-0$ および連続波での観測結果。左から、(a) CO $J=1-0$ 青側高速度成分 ($V_{\text{LSR}} = -78 \sim -58$ km/s), (b) CO $J=1-0$ ライン中心速度成分 ($V_{\text{LSR}} = -39 \sim -29$ km/s), (c) CO $J=1-0$ 赤側高速度成分 ($V_{\text{LSR}} = -19 \sim -9$ km/s), (d) 115 GHz 連続波の各マップ。影をつけた領域はCRL 2688の可視像をあらわしている。

3. 原始惑星状星雲 CRL 2688

CRL 2688 は双極ローブの形をした散乱星雲の代表的な天体として知られ、別名卵型星雲 (Egg Nebula) とも呼ばれている。古くから、その特異な形状は星の周りにダストトーラスがあるためと考えられていた。様々な分子輝線が強い強度で検出される天体でもあり、その輝線輪郭が球状に膨張するガスから放射されるときに予想される輪郭によく似ているため CRL 2688 の周りのガスは AGB 段階に星から放出されたガスであり、惑星状星雲の前段階にある天体、いわゆる原始惑星状星雲であると考えられている。

NMAによるCO $J=1-0$ の観測の結果を図3に示す。双極ローブの真ん中を中心にCOガスが広がっており、こちらに近づく青側高速度成分と向こうに遠ざかる赤側高速度成分がそれぞれ北側、南側のローブに沿って分布している。これによって、ローブに沿って双極流が存在していること、北側が手前に傾いていることが判る。また115 GHz 連続波のマップは双極ローブの軸に垂直にダストレーンに沿ったディスク構造をしている。VLA やハットクリークの干渉計による NH_3 や HCN の観測では、ダストレーンに沿った回転ディスクの存在が示されているので、この連続波はディスク内のダストからの輻射であると考えられる。

またNMAによってCS $J=2-1$, $1-0$ の観測も行なわれている(図4)。ビームサイズが違うことも考えにいけないが($J=1-0$ ではFWHMで $6''$, $J=2-1$ では $3''$), $J=1-0$ と $J=2-1$ では分布の様子が違っていることが判る。 $J=1-0$ のマップでは、双極ローブの真ん中にピーク的位置があり、ダークレーンに沿って広がっているように見える。 $J=2-1$ では2つの双極ローブの底の部分にピークが存在し、特に北側ではローブの側面に沿って分布しているように見える。この違いは $J=1-0$ と $J=2-1$ の2つの遷移における励起の仕方の違い、すなわちCS分子では $J=1-0$ は密度の高いところをトレースし $J=2-1$ は励起温度の高いところ

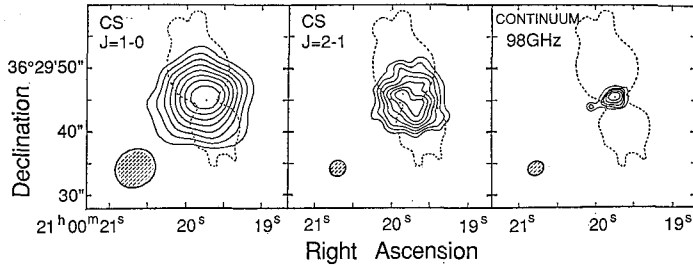


図 4 NMA による CRL 2688 の CS および連続波の積分強度図. 左から, CS $J=1-0$, CS $J=2-1$, 98 GHz 連続波の各観測結果. 各観測で得られたビームサイズ (FWHM) を図の左下に示してある. 破線で示しているのは可視像の輪郭である.

ろをトレースすることによると考えられる. つまり, 双極流の領域は温度が高く, 中心のディスク領域は密度が高いということになる. 98 GHz の連続波の分布は 115 GHz と同様に双極ローブの中央に集中している.

4. 惑星状星雲 IRAS 21282+5050 と NGC 7027

IRAS 21282 は 3.3, 3.4, 7.7, 8.6, 11.3 μm の強い赤外放射を示すことで注目された天体で, 光学領域の分光観測から若くコンパクトな (可視像の大きさ $1''2$ 以下) 惑星状星雲であると考えられている. また, 強い CO 輝線が観測されているが, その広がりが $10''\sim 20''$ 程度であるために, シングルデッシュではその構造を分解することはできなかった. 光学観測や CO の検出などから示されるように, IRAS 21282 が非常に若い惑星状星雲であるならば, その周りの CO ガスの分布や運動の様子を詳しく調べることによって, 質量放出や惑星状星雲の形成についての情報が得られることが期待される. 観測された CO の広がりは約 $12''\times 17''$ で, 南北方向に伸びている様子が見える. 図 5 に各速度成分毎の広がりを表す

図を示す. CO 輝線輪郭の中心線速度 ($V_{\text{LSR}}=18.0 \text{ km/s}$) から離れるにしたがって CO の広がりが小さくなっていくこと, 中心視線速度付近の 3 枚の図では IRAS 21282 の中心 (+印) の南側と北側にそれぞれピークが見えていることがわかる. これらの結果から, IRAS 21282 の周りの CO は膨張するトーラス状の構造をしていて, 我々はそのトーラスを軸に対して垂直な方向から観測していると考えられる.

NGC 7027 は惑星状星雲の代表格としてよく知られ, かつ色々な波長域にわたって最も良く調べられている惑星状星雲である. この天体でも CO や HCO^+ による観測が行われている. NGC 7027 は炭素星と同様な炭素過多天体である. 炭素過多の環境では, 宇宙線による H_2 の電離によって H_3^+ ができ, それと CO が陽子交換をして HCO^+ ができると考えられる. しかし, 惑星状星雲などの場合では, 中心星からの軟 X 線による電離で HCO^+ ができるとも考えられる. この場合 HCO^+ は分子ガスの内側, 中心星に近い部分に集中するはずである. したがって高角度分解能で HCO^+ の分布を調べてやれば, NGC 7027 における HCO^+ の形成過程を決定することができるはずである. 観測結果を見てみると, HCO^+ は分子ガス外層の内側, 電離ガスの近くに分布しており, 中心星からの軟 X 線による電離を支持しているようである.

5. おわりに

ミリ波干渉計による恒星進化の最終段階の観測はまだ始まったばかりといえる. その進化のシナリオを詳しく描くためには, より多くの天体を, いろいろな輝線で, より詳しく観測する必要がある. これは, より暗い天体, あるいは, より遠くの天体まで観測することであり, より高感度・高角度分解能が要求される. NMA は, 今まで見ることの出来なかった分子ガスの様々な構造を見せてくれた. 今後も次々と新しい世界を見せてくれるものと期待している. しかし, 研究者 (人間) の欲は限りないので, 内心, より高感度・高角度分解能が得られる次期大型ミリ波干渉計の登場を心待ちしているのも事実である.

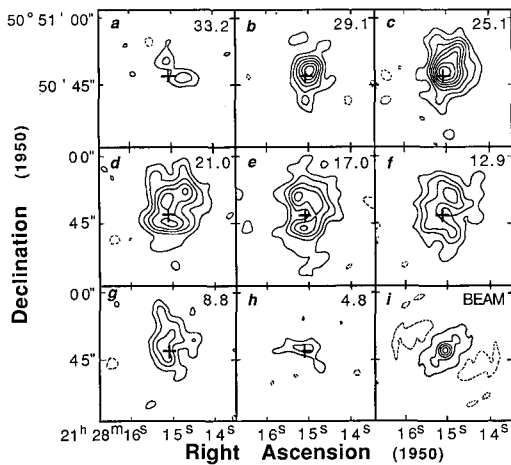


図 5 IRAS 21282+5050 の CO $J=1-0$ の観測結果. 各図は右上に示した視線速度を持った成分の広がりを表している. IRAS 21282+5050 の光で見える位置を + で示した. (i) は観測で得られたビームマップである.