

高解像度電波観測による小質量星形成コアの統計的研究

Statistical Study of Low-mass Star Forming Cores by High-resolution Radio Observations

(日本天文学会推薦)

代表研究者 茨城大学理学部 百瀬 宗武 Ibaraki University Munetake MOMOSE

協同研究者 東京大学理学部 河野孝太郎 University of Tokyo Kotaro KOHNO

研究目的

宇宙空間にあるダークマターではない通常物質の存在形態は、大きく星と星間物質とに分けられる。宇宙の物質は星と星間物質とを行き来し、循環しながら進化している。この宇宙物質の大循環の中で星の誕生は、星と星間物質を結びつけている重要な素過程であり、その包括的な理解は現代天文学の大きな課題である。

それでは星の誕生は具体的にどのようにして起こるのだろうか。星間物質の密度が高い領域は、ガスの最も主要な構成物である水素が分子の形態をとっているため、分子雲と呼ばれている。分子雲中には自己重力によって束縛されたより高密度なサブ・ストラクチャが存在しており、これらはしばしば分子雲コアと呼ばれる。星はこの分子雲コアが重力収縮することによって形成されると考えられている。

星形成の場である分子雲や分子雲コアを詳しく探る上で重要な手段となるのが、ミリ波・サブミリ波と呼ばれる波長帯での観測である。ミリ波・サブミリ波とは、それぞれ波長が $(1-10)\text{mm} \cdot (0.1-1)\text{mm}$ の電波を指す。これらの波長帯では、分子雲中に含まれる様々なガス種の輝線や固体微粒子(ダスト)の熱放射が観測され、可視光などでは得られない星間物質に関する情報が得られる。

ミリ波・サブミリ波帯での高空間分解能観測は、結合型干渉計と呼ばれる装置で行なわれる。現在、10mアンテナ6台で構成される野辺山ミリ波干渉計(NMA)を含め、5台のミリ波・サブミリ波干渉計が世界中で稼働しており、最高で約1秒角の分解能を達成している。また、日本が欧米との共同建設を目指しているアタカマミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)計画では、10km四方に12mアンテナ64台を展開することにより、最高0.01秒角の角分解能の実現を目指している。星形成過程を詳しく調べるためには、分子雲中の微細構造である分子雲コアを対象にする必要があるため、これら干渉計を用いた高空間分解能観測が本質的に重要である。

本研究の第一の目的は、NMAを用いた高解像度観測により、大質量星形成領域の詳細な物理状態を解明することである。星はその質量によって、内部で起こる核合成反応や進化経路、寿命などがほぼ自動的に決まる。よって、誕生する星の初期質量分布関数(IMF)を決める機構がわかれば、宇宙物質の進化を探る上で基礎的な情報を与えることになる。星は分子雲コアから形成されるので、IMFは分子雲コアの質量分布と密接に関わるはずである。そこで本研究では、最も近傍の大質量星形成領域であるオリオン分子雲を対象に、ダスト連続波高解像度観測を通じて小質量のコアまで空間的に分解し、その質量分布の調査を試みた。

本研究の第二の目的は、ミリ波・サブミリ波帯での超高空間分解能観測を実現する上で鍵となる「位相補償法」と呼ばれる技術の確立へ向けた第一歩を踏み出すことである。ミリ波・サブミリ波高解像度観測を実行する上で大きな障害になるのは、大気中の水蒸気分布の不均一が引き起こす波面揺らぎである。これは干渉計が取得するアンテナ間の相互相関関数(ビジビリティ)の位相項に誤差をもたらすことから、位相揺らぎとも呼ばれる。0.01秒角の

分解能を目指すALMAの性能をフルに発揮させるためには、この位相揺らぎを補正するための技法(位相補償法)の確立が不可欠であり、そのための研究が世界中で進められている。本研究では、特に「差動ラジオメータ法」と呼ばれる方法に注目して研究を進めた。これは、位相揺らぎを引き起こす水蒸気からの放射をアンテナに搭載された専用ラジオメータで受信し、各素子アンテナの視野内に含まれる大気中の水蒸気量を見積もることで位相揺らぎを補正しようという方法である。今回は主にフラックス較正観測データとの比較を通じて位相補償法の研究を進めたが、オリオンKLから放射されているSiOメーザーのデータとの比較も視野に入れて研究を進めた。

研究経過

1. オリオンKL領域の高解像度観測

オリオン分子雲は地球から約1500光年離れたところにある最も近傍の大質量星形成領域であり、オリオンKL領域は其中で特に顕著な活動性を示す場所である。オリオンKL領域には顕著なアウトフロー現象が見られることや大量の高密度ガスが存在していることなどから、その内部には大質量の原始星が存在していると信じられており、これまでも様々な視点から観測がなされてきた。今回はこの領域を対象に、波長2mmのダスト連続波をNMAを用いて複数視野で観測することにより、特に小質量コアまで空間的に分解してとらえ、より完全なコアの質量分布に対する情報を得ることを目指した。この種の観測を行う上で障害になるのは大気による位相揺らぎであるが、オリオンKL領域には干渉計の解像度よりも広がり十分小さいSiOメーザーが存在しており、それを利用して位相揺らぎをリアルタイムで補償することができた。なお、当初複数視野を観測する際にはSiOメーザー源と観測視野とを短い時間間隔で切り替える方法(ファーストスイッチング法)を用いる予定であったが、実際観測を行ってみるとSiOメーザーが予想よりも強く、隣接した視野でもメーザー放射が検出され位相揺らぎを補正できることがわかったので、今回は通常モードで観測を実行した(位相補償法の基礎研究の研究経過については後述)。

図1にSiOメーザーを中心にした視野に対して得られた結果を示す。図1(a)は広がった成分まで十分に捉えられるよう、4秒角程度に解像度を落としたマップである。南北に広がるダスト・クラウドが存在しており、その中に顕著なピークがいくつか見られる。しかし取得したデータすべてを用いて解像度を1.7秒角程度にすると、より細かい構造が明らかになってくる(図1(b))。図中でアルファベットで示したように、図1(a)でははっきり分解することができなかった微小な分子雲コアと見られる放射ピークがダスト・クラウド中に複数とらえられた。これらピークの電波強度と過去のガス観測から推定される温度を用いてコアに含まれる質量を見積もると、もっとも小質量のもの(ピークKに対応するもの)で約1太陽質量、最も大質量のもの(ピークBに対応するもの)で約20太陽質量であることがわかった。この領域ではSiOメーザーを伴う大質量原始星がすでに誕生しているはずだが、今回の結果はその周辺でもより小質量の星が活発に誕生しつつあることを示唆している。

「すばる」などの赤外望遠鏡を用いた最近の観測によると、オリオンをはじめとする大質量星形成領域では、主系列星として水素の核燃焼を起こすことができない0.08太陽質量より軽量の星(褐色矮星)が多数誕生しているらしい。今回検出された微小なコアが、このような褐色矮星の母胎であるかについて確定的なことはいえないが、過去の観測・星形成の理論から分子雲コアから最終的に星へと落ち込む質量は全体の5%程度だと考えられており、その可能性は十分にあると考えられる。現在稼働中の干渉計では、感度やマッピング能力の制限から分

子雲全体にわたる高解像度サーベイは困難ではあるが、今後も引き続き領域の拡大をはかっていきたい。将来ALMAが実現した際には、このような観測をより広い領域にわたって行うことにより、IMFと分子雲コアの質量分布との関係がより深く理解されることだろう。

この他、2002年度はオリオンKLに直接付随するガス成分の詳しい運動情報を得るため、SiOの熱的放射のNMA観測も合わせて実行した。こちらは本稿執筆時点で観測が継続中のため、まだ結果はでていないが、次項で述べる位相補償法の基礎データという側面も含め、なるべく早く結果が出せるよう解析につとめている。

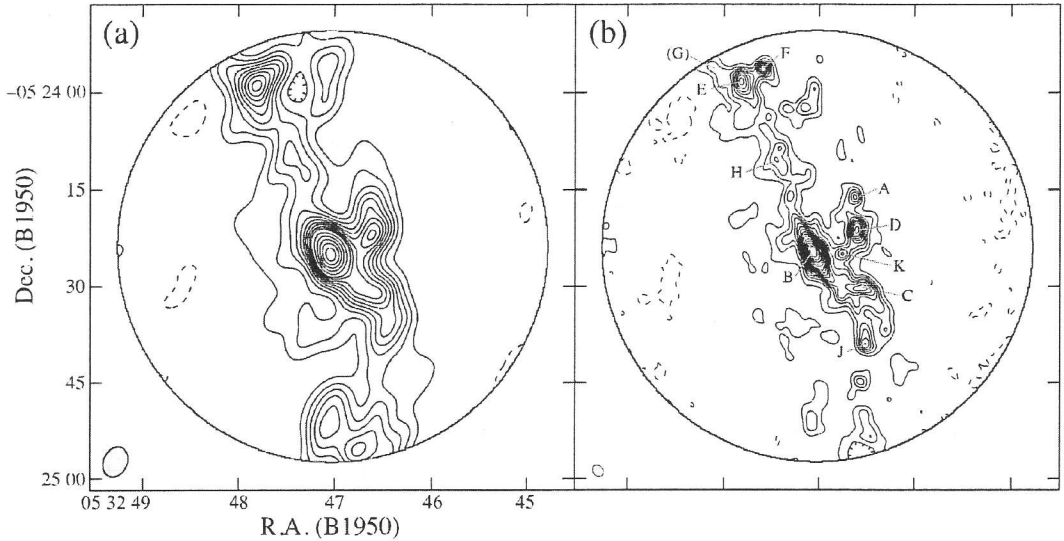


図1 : The CLEANed map of the continuum emission at 129.3 GHz in the Orion KL regions with the NMA. (a) Map obtained from the visibilities of the baseline shorter than $40 \text{ k}\lambda$ with uniform weighting. The resultant synthesized beam size, shown at the bottom left corner, is $4.85'' \times 3.67''$ with the position angle = 155° . The contour levels are $(-1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22) \times I_\nu$ where $I_\nu = 40 \text{ mJy/beam}$ ($= 0.164 \text{ K}$). Negative contours are shown by dashed curves. (b) Map obtained from all the visibilities with uniform weighting. The resultant beam size, shown at the bottom left corner, is $1.94'' \times 1.55''$ with $\text{PA} = 37^\circ$. The contour levels are the same as (a) but $I_\nu = 15 \text{ mJy/beam}$ ($= 0.364 \text{ K}$).

2. 位相補償法の基礎研究

位相補償法に関する当初の計画では、220GHzで動作するアンテナ搭載型ラジオメータを使用しながら、観測天域と較正天体を高速で切り替える観測法(ファーストスイッチング法)によってデータを取得し、ラジオメータ出力と干渉計データを比較していく予定であった。しかし申請後の研究動向も考慮した結果、実際には二点で方針変更して研究を遂行した。まず第一に、ラジオメータの動作周波数を220GHzから190GHz帯に変更した。これは、220GHzでは位相揺らぎに寄与しない液相(雲)成分からの放射が大きいため高い精度が期待出来なかったことと、ALMA計画での位相補償として183GHzの水蒸気輝線の出力をモニターする方法が採用され、将来的にそれに直接つながる研究を行うことが重要であるという判断があったためである。第二に、ファーストスイッチング法に関してはその原理的な簡明さか

らずでcm波帯で実用化されていることや、我々の科学的観測の中でそれを実行するメリットがさほど大きくないことがわかったため、今回は差動ラジオメータ法に集中して研究を進めた。基礎データの具体的な取得法としては、ラジオメータの差動出力と直接比較が容易な、フラックス較正観測のデータやスイッチングなしで観測したオリオンSiOメーザーのデータを用いることにした。ラジオメータの改造に必要な部品代は別財源をあたったが、基本的な測定器、実験器具を当財源で購入させていただいた結果、実験室でのラジオメータの性能測定を効率よく行うことが出来た。

実験に用いたラジオメータ単体の構成概要は以下の通りである。まずフィードホーンから入ってきた電波は、ミキサによってIF帯(中心周波数1.4GHz、帯域幅400MHz)に周波数変換される。このラジオメータはもともと220GHz帯で動作していたが、周波数変換部を入れ替えて190GHz帯で動作するものに改造した。IF信号は低雑音アンプで増幅されたあとDC信号に変換され、デジタル電圧計で読みとられる。アンテナ搭載時にはこのデジタル電圧計を GPIB制御することにより自動的にデータを取り込むことが出来る。ラジオメータ前置光学系には回転ミラーと異なる温度をもつ2つの温度標準が装備されている。アンテナ搭載時には GPIB制御でこの回転ミラーを切り替えることにより、これら温度標準とアンテナビーム内の大気放射とを交互に観測できる。実際の観測では、約5分に一回、温度標準に対する出力を測定してゲイン較正を行い、水蒸気放射パワーを温度換算して測定している。

改造が終わったラジオメータはまず実験室で基本性能測定を行い、位相補償実験に十分使えるかをチェックした。具体的には、(1)システム雑音温度の測定と、(2)システム全体のゲイン安定度の測定である。その結果、システム雑音温度は約1200K、5分間でのゲイン変動は(0.03–0.06)%であった。これらから予想される輝度温度の測定誤差は、4秒積分時で1.8K以下となり、NMAの観測波長である(2–3)mm帯で位相補償実験を行うには十分な精度が確保できていることが確かめられた。このような手順を踏むことで2001年度にまず2台のラジオメータを立ち上げ、これらを2002年3月から5月の間にNMA素子アンテナに搭載してデータを取得した。2002年度はさらにもう1台のラジオメータを立ち上げた結果、2003年1月からは計3台のアンテナに搭載して空の輝度温度を常時モニタしている。

干渉計データとラジオメータ差動出力の比較例として、2002年3月28日に行われたフラックス較正観測データの結果を示す(図2)。図2(a)はラジオメータが搭載された2アンテナ間で得られた較正天体に対するビジビリティ位相を示す。これは大気の影響がなければ一定値(0°)になるべきもので、そこからの大きなズレは大気の影響を表している。図2(b)は同じ時間に2台のラジオメータ出力から求められた輝度温度差を示す。図2(a)と非常によい相関があることが見られ、位相揺らぎのもとである水蒸気量の差が良くとらえられていることが示唆される。実際、図2(a)と(b)の比較から輝度温度差を位相値に変換し(図2(c))、補正を試みた結果、生データではr.m.s.で 74° あった位相揺らぎが補正後は 29° まで抑えられることがわかった(図2(d))。このとき、光路長差で表した位相揺らぎ量と輝度温度差との変換係数は0.1 [mm/K]となり、大気モデルの計算結果から示唆される値と比較して妥当な値であることが確かめられた。短時間ではあるが、これは野辺山におけるこの周波数帯での位相補償が初めて成功した例である。

その後2003年2月には3台のラジオメータを稼働させながら大質量原始星オリオンKLに付随するガス観測を行い、数時間にわたってSiOメーザーのデータを取得した。SiOメーザーの位相変動は大気位相揺らぎを良くトレースし、かつフラックス較正観測のように短時間で天体を切り替えることがないため、差動ラジオメータ法の開発研究をする上でも貴重なものと

なっているはずである。本稿執筆時点では未だ解析途中であるが、近々結果を出せるものと考えている。

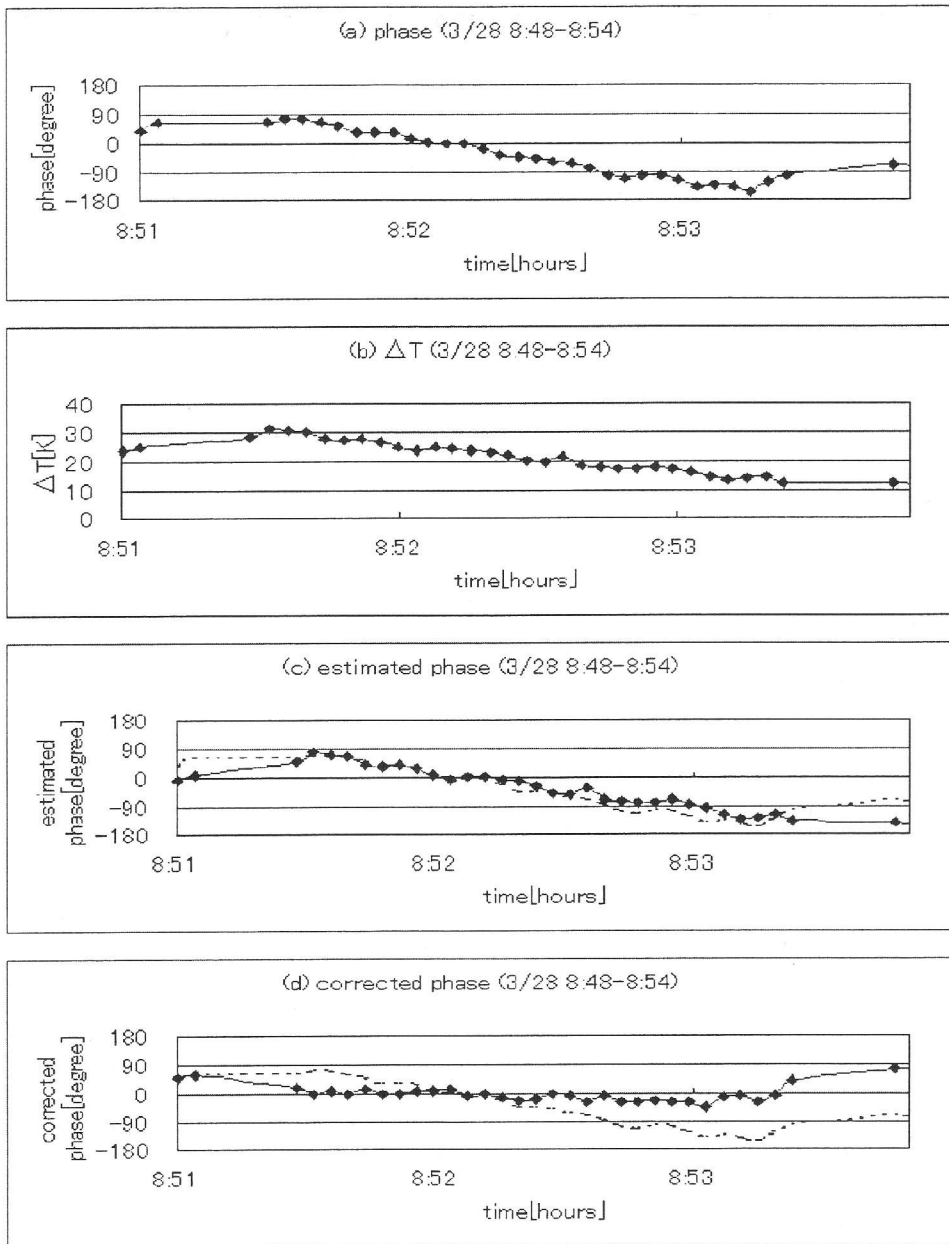


図2：Example of phase correction using the differential radiometers operating at 191 GHz in the Nobeyama Millimeter Array (NMA).

考察

今回の一連の研究では、星形成に関する天文学的な研究と観測精度向上のための位相補償

法の開発という二つの点で、一定の成果を挙げることが出来た。もちろんこれらの成果はまだ初期段階と言うべきものでさらなる発展の余地が残されており、今後も引き続き研究を続けていくべきものである。最後に一つ強調しておきたい点は、観測の較正技術の開発は天文学的成果に直接結びつくことから、両者を一体のものとして進めていくことが相乗効果を生み、研究を進める大きな原動力になったということである。これは大学における学生指導をしていく上でも、非常に有効な方針であった。

研究発表

口頭発表

1. 百瀬宗武、石場庸子、鎌崎剛、幸田仁、河野孝太郎；NMAを用いた183GHz差動ラジオメータ位相補償法の基礎実験 I、日本天文学会2002年秋季年会、2002年10月、宮崎市
2. 百瀬宗武、石場庸子、高橋智子、鎌崎剛、河野孝太郎；NMAを用いた183GHz差動ラジオメータ位相補償法の基礎実験 II、日本天文学会2003年春季年会、2003年3月、仙台市