

ボトムアップで探る大質量原始星ジェット — 大学望遠鏡から ALMA へ

元 木 業 人

〈山口大学時間学研究所 〒753-8511 山口県山口市吉田1677-1〉

e-mail: motogi@yamaguchi-u.ac.jp



近年8太陽質量を超える大質量星も円盤降着によって形成されていることが決定的となりつつある。しかし現状では円盤から星本体へ流入するガスを空間分解することは難しく、将来ALMAを用いて研究されるべきテーマの一つである。一方、原始星ジェット／アウトフローといった質量放出現象は間接的に星近傍の状態を探ることができる有力なツールである。われわれは北海道大学苫小牧11 m電波望遠鏡および国立天文台VERAを組み合わせた観測から、大質量原始星ジェットの根元付近（～200 AU）の構造が激しく変動する様子を明らかにした。この結果はALMA時代に観測が進むであろうスケールにおいて、極めて動的な星周構造が現れることを予想させるものである。本稿では大質量星形成研究の現状と合わせて、われわれの発見したジェットの活動性について紹介する。

1. 大質量星形成研究の現状

太陽質量の8倍を超える星は一般に大質量星と呼ばれる。夜空を彩る明るい星、輝く星雲、ド派手な超新星などなど、われわれの目を楽しませてくれる華やかな天体現象のかなりの部分はこの大質量星に関連している。また大質量星は宇宙における物質進化の根本的な要素であり、われわれを形作る重元素のほとんどが大質量星内部で作られている。さらにさらに銀河系の大部分の星は大質量星とともに産まれたと考えられているし、宇宙最初の星も大質量星であったと予想されている。さあどうだろう？ これだけ書けば多少なりとも大質量星に興味をもてただけだろうか？

「なぜ宇宙が今日の見た目をしているのか」という素朴な疑問を考えるにあたり、大質量星は欠

くべからざる重要なピースである。にもかかわらずその詳細な形成機構は未だ明らかになっていない。これにはよく言われる以下の理由がある。

(1) 数が少ない*1。(2) 形成場所が太陽から遠い*2。(3) 必ず星団として誕生する。つまり滅多に見つからない上に遠くて密集しているため、個々の原始星の周囲で何が起きているかを知ることが難しいわけである。一般に膨大なガスとチリに埋もれた大質量原始星の研究においては透過性の高い赤外線から電波域での観測が威力を発揮するが、これまでの観測装置の典型的な視力や感度では詳細な研究を行うには全くもって不十分であった。

こうした状況は人類史上最大の電波干渉計であるALMAの登場によって大きく打開されると期待される。ここではまず大質量星形成研究の現状

*1 数としては銀河系内の星の10%程度に過ぎない。

*2 軽い星の形成場所と比べた場合、最も近いものでも4倍、一般に10-30倍遠い領域を観測しなければならない。

と今後何が求められているかについて簡単に紹介したい。

1.1 低質量星との違い

全ての星は低温高密度な水素分子の雲（分子雲）から産まれる。実際には分子雲中の特に密度が高い領域（分子雲コア）が自己重力でつぶれて星になるわけだが、この際密度が高いほど短時間で収縮するため^{*3}、中心付近の高密度ガスは真っ先につぶれて原始星となり、遅れてきた外側のガスは原始星へと降り積もる「質量降着」の形をとる¹⁾。このような重力収縮+降着による星形成過程は低質量星に対しては理論、観測の両面から十分に確立されている。

一方、同じ過程で大質量星を形成する場合、当然低質量星の場合に比べて多量のガスが必要であり、また自身の強い放射圧に打ち勝てるだけの大きな降着率が要求される。後者は放射圧問題²⁾と呼ばれる古典的な疑問で、例えば20-30太陽質量（以下 M_{\odot} ）程度の主系列星の放射圧に打ち勝つために必要な降着率は 10^{-4} - $10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ となる。これは低質量星の場合に比べて100-1,000倍に相当する膨大な量である。

降着率は重力収縮を起すガスの総量と自由落下時間で決まるため、つまるところいかにして大量のガスを集め、一気に収縮させるのかという初期条件の問題に帰着する。これは今なお議論が続いている大質量星形成の最重要問題の一つである。

1.2 初期条件と形成モデル

大質量星形成を考える上で一番やっかいな問題は、単に低温ガスを大量に集めるだけでは自己重力の作用で多数の軽い分子雲コアに分裂してしまう点にある。一般に静的な分子雲の重力収縮を考えた場合、コア質量と降着率は共にガスの温度に依存する^{*4}。例えば分子雲の典型的な温度（ ~ 10 K）と密度（ 10^2 - 10^3 cm^{-3} ）を考慮すると、分裂したコ

アの質量は 1 - $10 M_{\odot}$ 、降着率は $10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 程度となり、全くもって大質量星を作るには不十分ということになる。ならば初期条件が高温ならば良いのではないか？…ということになるのだが、残念ながら大質量星形成の母体となる（と考えられている）分子雲は、低質量星の場合と変わらず低温であることがわかっている³⁾。

現在上記のような低温ガスの過剰分裂を回避する機構として、超音速の乱流（分子雲内のランダムなガス運動）や磁場による「支え」や外圧による「閉じ込め」が考えられている⁴⁾。すなわち純粋なガスの圧力で支えられるよりも多量のガスを高密度な環境に無理矢理押し込むわけである。こうした高密度環境の起源としては分子雲同士の衝突⁵⁾や、分子雲内部の乱流衝突⁶⁾による動的なガス圧縮などが提案されている。

このような初期条件の下で起こる大質量星形成の理論モデルは2000年代初頭あたりから提唱されており、Monolithic Collapse⁷⁾とCompetitive Accretion⁸⁾の2系統に大別される。詳細については述べないが、収縮を起す直前の大質量コアが重力的に安定かどうか（専門的に言うとビリアル平衡かどうか）が両モデルの違いである。前者の場合は重力中心であるコアの中心へ向けて暴走的な収縮が起こり、大質量星が形成される。後者の場合はコア全体が重力不安定になった後、原始星団全体の重力でガスを引き込む。各原始星はガスを奪い合って成長し、より多くのガスを獲得したものだけが低質量星となる。どちらが正しいのかについてはいまだ決着がついておらず、現在も重力的に束縛された大質量星なしコアの探索などが盛んに行われている⁹⁾。

またいずれの場合もガス自体は低温なため、最終的にコアを支える乱流や磁場が抜けた後は重力不安定によるガス分裂を免れない。そのためコア

*3 収縮にかかる時間（自由落下時間）は密度の1/2乗に反比例する。

*4 自己重力によって形成されるコアの典型的質量は温度の3/2乗に比例し、密度の1/2乗に反比例する。一方、降着率は温度の3/2乗のみに比例し、密度には依存しない。

以下のスケールで小星団が形成されるという点は同じである。その上で星の質量を大きくするためには大質量原始星自身の星周ガス加熱による分裂抑制の効果が重要であることが指摘されている¹⁰⁾。このように大質量星形成過程は定性的な問題から、分裂の程度や上限質量などの定量的な問題へと議論が移りつつある。

1.3 階層的な降着構造

精密な理論的モデルはさておき、観測的には質量降着による大質量星形成を支持する結果がこの10年間で数多く報告されている。特に低質量星形成の場合に一般的な降着円盤を発見するべく、回転構造の探査が活発に行われてきた。これまでに大質量星形成領域で見つかった回転構造は、遠心力半径に達していない円盤状の構造 (Pseudodisk) も含めると非常にスケールの幅が広く、 10^2 - 10^4 AU程度 ($1 \text{ AU} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$) のものが発見されている¹¹⁾。こうしたサイズのばらつきは分子雲コアの初期角運動量の違いによるものと考えられる。

図1に現状で観測的に示唆されている降着構造の模式図を示した。重力収縮の兆候を示す大質量コア¹²⁾ から、原始星団周りの降着エンベロープ、

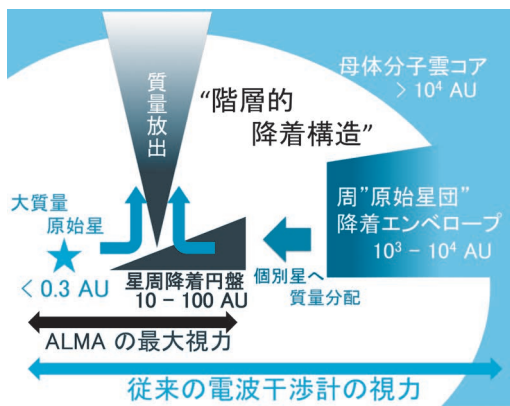


図1 大質量原始星周囲の階層的な降着構造の模式図。

個々の原始星周囲の降着円盤^{13), 14)}へと階層的な降着構造をもつことがわかっている。中でも遠心力によって支えられたまさしく円盤と呼ぶべき構造はおおよそ 10^3 AU以下程度のサイズである。これはALMAによって空間分解可能なスケールであり、いよいよ円盤探しから円盤の性質を明らかにするような観測へと移行することが期待されている。

1.4 質量放出現象

さて、円盤の直接観測はもちろん今後の重要課題なのだが、それに加えて質量放出現象の観測もまた大質量星形成過程の解明に欠かせない要素である。

一般に原始星ジェット／アウトフローといった質量放出現象は降着円盤内奥 (<1 AU) において駆動され¹⁵⁾、余分な角運動量の除去や、超音速乱流の維持、星形成効率 (母体コア質量の何割が星に変わるか) の決定などに重要な役割をもつと考えられている。特に大質量星形成においては以下の二つの点で重要である。(1) 放射の脱出経路となる空洞 (アウトフローキャビティー) を形成し、星周ガス加熱による分裂回避に影響を与える¹⁶⁾。(2) 質量放出率から原始星近傍での実効的な降着率を推定できる。特に後者は大質量原始星の詳細な進化過程を理解するうえで非常に貴重な情報である¹⁷⁾。

大質量星形成で観測されるジェット／アウトフローの特徴¹⁸⁾としては、一般に質量放出率が非常に大きく ($> 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$)、降着率の大きさをそのまま反映していると考えられている。また低質量星形成で見られるような収束度の良いジェットは発見例が少なく、超コンパクトHII領域^{*5}を伴わないような極めて若い天体でしか見つかっていない。これは中心星進化に伴う放射圧の増加や、円盤の加熱によるプラズマ状態の変化に関連していると考えられている^{*6}。

*5 零年主系列到達後、紫外線の増加によって形成される電離領域。大質量星進化の目安としてよく用いられる。

*6 中心天体の進化段階に応じて段階的にその収束度が弱まるのではないかという形状進化説が提唱されている¹⁸⁾。

1.5 VLBIを用いたジェット／アウトフロー観測

実際に大質量星形成領域においてジェット／アウトフロー観測を行う場合には以下の点に注意する必要がある。(1) 原始星団内の複数天体からのジェット／アウトフローが複雑に入り交じる。(2) 運動量輸送によって母体コアから巻き込まれる質量を考慮しなければならない。特に後者は質量放出率の見積りに深刻な影響を与えることが明らかであり¹⁹⁾、可能な限り高い分解能で根元に近い領域を観測し、本質的な情報を得ることが望ましい。

大質量原始星近傍から直に吹き出している成分を捉える手段としては、高温ガスから放出される水素分子の振動励起輝線の赤外線観測や酸化ケイ素などの強い衝撃波中で励起される分子輝線を用いた電波観測が一般的である。しかしながら前者は減光の影響から、後者は空間分解能の制限から根元付近の観測には自ずと限界がある。また電離成分に対する電波連続波の観測は比較的高い分解能が得られるものの、質量や速度といった物理量を導出する際の不定性が大きい。

これに対して超長基線干渉計 (Very Long Baseline Interferometry; VLBI)^{*7}を用いた星間レーザー現象^{*8}の観測はまさしくこうした“辛いところ”を観測する能力をもっている。特に水蒸気や酸化ケイ素のレーザー輝線はジェット／アウトフロー衝撃波によって強く圧縮加熱されたガスから放射されるため、本来は近赤外域で捉えられるような高温ガス (500–1,500 K) を電波帯 (それもセンチ波帯) で手軽に観測することが可能である。

レーザー放射は一般に衝撃波圧縮されたガスの中でも、励起条件 (温度, 密度, 速度構造) を満

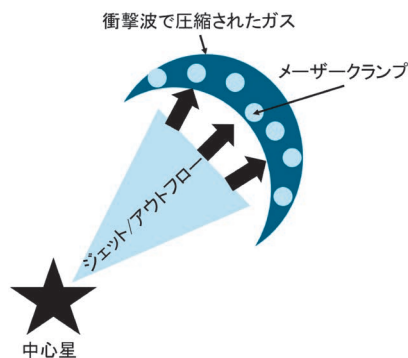


図2 衝撃波圧縮されたガスとレーザーランプの模式図。

たした領域からのみ放射される。そのため個々の放射領域は非常に小さな (~1 AU) ガス塊 (レーザーランプ) であり、図2に示したように圧縮ガス中にポコポコと散在して現れるのが一般的である。

こうした特徴はジェット／アウトフローと母体コアの境界やジェットの内部衝撃波などの3次元運動を測定する際に非常に都合が良い。これは丁度川の流にカラーボールをばらまいた状況を想像していただければ良い。流れていくボールを目で追うのは簡単であり、水面を直接見るよりも容易に流れの向きや速さを知ることができるというわけだ。

これらの星間レーザーのVLBI観測では、中心天体から1,000 AU以内におけるジェット／アウトフローの運動や構造を知ることができる。例えばこれまでに円盤から吹き上がるアウトフロー¹⁹⁾や、高速のジェットを中心に低速アウトフローが入れ子状に駆動されている様子などが明らかにされている^{20), 21)}。

^{*7} 電波干渉計の中でも基線長が極めて長く (100–8,000 km)、各アンテナ素子が独立した時刻・周波数標準をもつもの。対してALMAのようにすべての素子が共通の時刻・周波数標準に接続されているものを結合型干渉計と呼ぶ。前者は後者に比べて分解能が高い反面、感度は非常に低い。

^{*8} レーザー現象は特定条件下で起こる連鎖的な誘導放射現象である。可視光帯でのレーザー現象に相当し、極めて輝度が高いためVLBI観測が可能である。

2. 大質量原始星ジェットの根元に迫る

筆者らは以上のような背景の下、活発な質量降着期にあると予想される大質量原始星ジェット天体の観測を行ってきた。そのような中で、数年にわたる水蒸気レーザーのモニター観測から、ジェットの根元付近の構造が活発に変動する天体が発見された。以下では、筆者らの発見した“活動する”大質量原始星ジェットについてご紹介する。

2.1 若いジェット天体: G353.273+0.641

ジェットの変動性が見つかった天体は G353.273+0.641 (以下, G353) という、銀河座標に基づく名前しかもない地味なヤツであった。太陽からの距離は 1.7 kpc 程度と大質量星としては近傍といえる。近～中間赤外線観測から求められたボロメトリック光度は 10^4 太陽光度程度であり、超コンパクト HII 領域も付随していない。まさしく典型的な大質量原始星ジェットの母天体である。

同天体は静止速度から大きく青方偏移した視線速度成分 (~ -50 から -130 km s^{-1}) に強度ピークをもつ、青方偏移卓越レーザー²²⁾ と呼ばれる特殊な水蒸気レーザー源の一種として知られており (図3)、視線方向に沿った見込み角をも

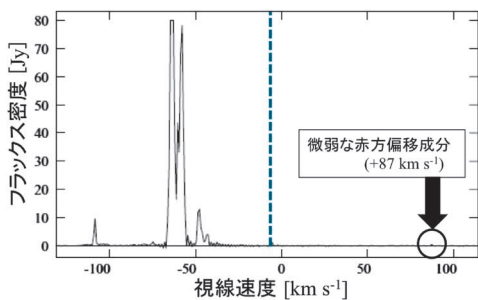


図3 Caswellらによって得られた水蒸気レーザーの干渉計スペクトル。詳しくは Caswell & Phillips を参照のこと²²⁾。青い破線は中心星の速度 ($\sim 4.5 \text{ km s}^{-1}$) を表している。

つジェットによってレーザーが励起されていると推定されていた。実際に筆者らが豪州の電波干渉計 (Australia Telescope Compact Array; ATCA) を用いて行った観測により、ジェット衝撃波によって生じた電離プラズマからの自由-自由放射 (いわゆる電波ジェット) が検出されている²³⁾。

図4に国立天文台のVLBI装置である VLBI Exploration of Radio Astrometry (VERA) によって得られた水蒸気レーザーランプの全分布を示した。同レーザーは東西方向に延びたジェットの根元付近 ($\sim 200 \text{ AU}$) に集中しており、静止速度に対して青方偏移した成分が東側に、数は少ないものの赤方偏移した成分が西側に検出されている。

2.2 水蒸気ジェットの間欠泉

G353は元々 VERA プロジェクト^{*9)}の対象天体の一つであり、2008年4月頃から水蒸気レーザーの VLBI モニター観測が始まっていた。たまたま担当となった筆者が頭2回の観測データを解析したところ、僅か5カ月間で水蒸気レーザーが200

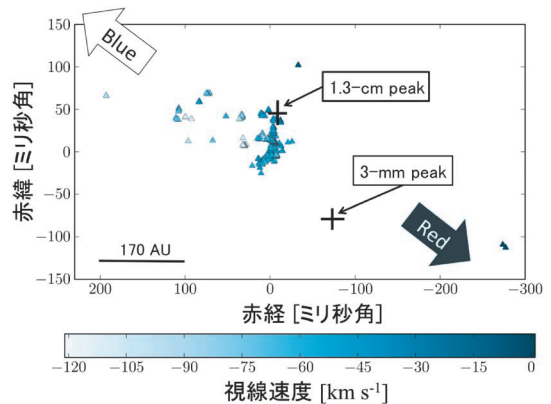


図4 VERA によって得られた G353 に付随する水蒸気レーザージェットの全体像。各三角点はレーザーランプの位置と速度を表す。波長 1.3-cm 帯および 3-mm 帯で検出された電波連続波の強度ピーク位置を十字で示している。

*9 VERA プロジェクトでは水蒸気レーザー源の位置を通年で複数回測定し、その年周視差から天体距離を求めることを目的としている。

倍に増光していることが判明した。

一般に大質量星からのアウトフローに付随する水蒸気レーザーでは、レーザーランプの構造変動に起因した増減光は頻繁に起こる。この場合衝撃波圧縮を受けたガス内でレーザーランプの生成散逸が繰り返されるが、全体の構造はさほど変化しない。例えば定常衝撃波面の場合であれば10年以上にわたって構造が安定なこともある²⁴⁾。

一方のG353のケースでは増光の前後でレーザーランプの空間分布が劇的に変化している点が“ミソ”であった。このような増光は衝撃波構造自体の変動を意味しており、ジェットの根元で何かしらの動的な現象が起こっていることは明らかである。

そうだとすれば水蒸気レーザーの強度変動からジェットの変動を手軽に追いかけることができるのでは?…と予想されたが、VERAによるVLBI観測は通常3カ月から4カ月に1回と連続的な変動を追いかけるには間隔が空きすぎていた。そこで筆者は当時博士後期課程で在籍していた北海道大学の所有する苫小牧11 m電波望遠鏡を用いて水蒸気レーザーの高頻度モニター観測を開始した。

G353は赤緯が -34° と南天側の天体であり、北海道からの観測では仰角が 13° 程度までしか上がらない。普通ならまずやらないような観測であり、当時筆者の観測を目撃された方々は地をほう

ように首を振る望遠鏡の姿に首を傾げておられたことだろう。それでも増光時のレーザーが明るいこと、北国ならではの低温環境などのおかげで週一以下のペースで観測を行うことができた。

図5にこの2008年から2013年にわたる5年間のレーザー光度曲線を示す。この図からもわかるようにG353の水蒸気レーザーはおおよそ1年程度の間隔で激しく増減光を繰り返していた。また増光の後にはほぼ必ず11 m鏡の感度限界程度まで減光するという、まさに間欠泉のような振る舞いであった。

2.3 再帰的な衝撃波伝播

時間分解能の良い単一鏡モニターによって首尾よく変動現象の輪郭をつかむことができた。次にわれわれは“間欠泉”の吹き出し時に空間的には何が起こっているのかを明らかにするため、VERAによるVLBI観測の頻度を月1回程度まで引き上げて観測を行った。

図6は2008年から2012年の間に捉えられた計4回の増光期に、ジェットの根元付近のレーザーランプがどのように分布しているかを示したものであり、各増光期ごとに衝撃波の構造が全く異なっているのが見て取れる。また一定の領域で繰り返しランプが形成されていることから原始星近傍100 AU程度のスケールで再帰的な衝撃波伝播が起こっており、それに応答してレーザーが増光していることが推測された。

そのような再帰的衝撃波の起源についてはいくつかの可能性が考えられる。最も単純な例では中心星からプラズマの塊が間欠的に吹き出しているというものである。一般に原始星ジェットは時間的に非一様な吹き出し方をしている場合が多く、実際にジェットの吹き出しを観測的に捉えた例も少ないながら報告されている²⁵⁾。ただしそれらは数年から10年程度の時間スケールで起こっており、今回のG353で見られた1年程度という時間間隔はかなり短い部類に入る。

もう一つの可能性として、ジェット内部の速度

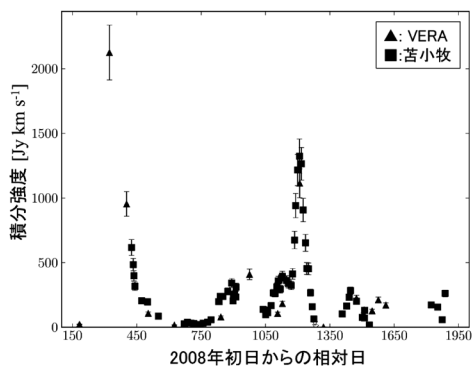


図5 苫小牧11 m鏡およびVERAによって得られた水蒸気レーザーの光度曲線。

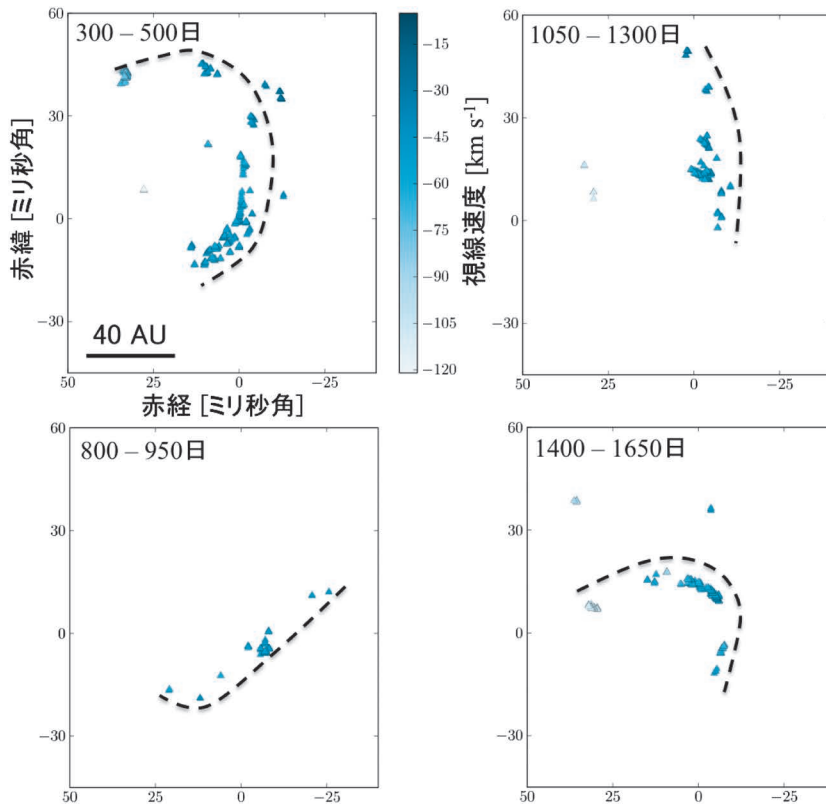


図6 VERAによって捉えられた4回の増光期におけるジェット根元付近のメーザー分布. 黒い破線は予想される衝撃波面の輪郭を表す.

差によって頻繁に内部衝突が起こっている場合も考えられる. これは低質量原始星のジェットにおいてよく議論されるモデルであり, 定常の衝撃波面が形成されない点からいっても G353 の事例をうまく説明できるかもしれない.

2.4 ジェット加速

G353 の“間欠泉”で見つかったもう一つの重要な現象としてジェットの加速がある. 図7は苫小牧 11 m 鏡によって得られた水蒸気メーザーのダイナミックスペクトルであり, 2011 年から 2013 年にかけて系統的な加速が続いていることがわかる.

また Motogi et al.²⁶⁾でも報告したとおり, 2011 年以前のデータでも -50 km s^{-1} と -70 km s^{-1} の二つの異なる速度成分が同様の傾向を

見せており, 個別のメーザーランプではなく領域全体が一様に加速されていると考えられる.

加速度の大きさは年間 $5\text{--}10 \text{ km s}^{-1}$ 程度であり, メーザージェットのスケール ($\sim 200 \text{ AU}$) と典型的密度 (10^9 cm^{-3}) を考慮すると年あたりで $10^{-2}\text{--}10^{-3} M_{\odot} \text{ km s}^{-1}$ の運動量が供給されていることになる. これは大質量星形成における質量放出率や速度を考えれば十分に説明できる範疇である.

果たしてこれがジェット本体の内部加速なのか運動量輸送を受けた星周ガスの加速なのかは現時点では不明だがどちらにしても衝撃波の通過によって原始星近傍のガス構造に何らかの動的な変化が起こっていることは明らかである.

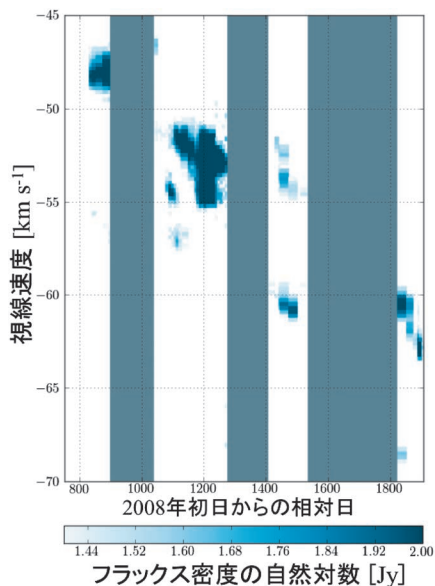


図7 2度目の増光以降の単一鏡データから作成したダイナミックスペクトル。各速度成分の電波フラックスをカラーで表示しており、弱い放射を強調するため100 Jyを上限としている。グレーで塗りつぶされた時期については観測を行っていない。

2.5 ALMAへ向けて

以上のようにVLBIの高分解能と単一鏡の自由度を組み合わせた観測によって、大質量原始星ジェット根元付近の衝撃波加速をこれまでになく詳細に捉えることができた。もちろん今後はガス構造全体の観測を行ってその正確な起源について探りたいわけであるが、残念ながら感度の低いVLBIではそうした観測は不可能である。

幸い今回変動の兆候が見られた200 AU（100ミリ秒角）というスケールはまさに先々ALMAによって空間分解可能なスケールであり、最終的には直接物理状態の変動を観測し、ジェットの活動性の起源を明らかにすることができると期待される。

そこで現在筆者らは高感度の結合型干渉計(ATCA, SMA, JVLAなど)を用いて、ジェット／アウトフロー全体の観測や質量放出率の測定、降着円盤の探査など1-2桁大きいスケールでの追観

測を行っている。まさに“ボトムアップ”でALMAに向けた準備研究を進めているわけである。

また、より一般的なジェットの性質を明らかにするため、G353に類似した青方偏移卓越メーザー天体群に対して国内の大学連携VLBI網によるVLBIモニターや野辺山45 m鏡による分子ジェット探査、ATCAを用いた南天での多周波観測プロジェクトなど「2匹めのドジョウ」探しも進めている。

3. おわりに

現在天文学の多くの分野で高分解能かつ高感度の観測が求められ、必然的に装置の大型化が進んでいる。一方で近傍天体の観測の場合、“より細かく見る”ということと同義である。本研究でも示されたように、星形成分野においてもやがては時間分解能が重要な観点となってくる可能性が十分にある。当然国際的な大型装置のフットワークには必ずと限界があり、そういった部分で自由度の高い国内装置、あるいは大学所有の小口径望遠鏡の存在意義がまだまだあるということを最後に強調しておきたい。タイトルに使った“ボトムアップ”という単語はVLBIによる最小スケールの観測から始まる研究という意味に加えて、大学望遠鏡から大型装置への研究発展という意味も込められている。

謝辞

本稿の内容は2011年に出版された筆者の博士論文、および投稿論文（近々発表予定のものも含む）に基づいたものであり、博士課程当時の指導教官である徂徠和夫氏をはじめ、長期のモニター観測にご協力いただいた北海道大学宇宙物理学研究室の方々、および国立天文台VERA関係者の方々へ深く感謝いたします。なお本研究は学術振興会特別研究員DCおよびPDとして行ったものです。

参考文献

1) Masunaga H., Inutsuka S.-i., 2000, ApJ 531, 350
 2) Wolfir, M. G., Cassinell, J. P., 1987, ApJ 319, 850
 3) Rathborne J. M., Jackson J. M., Simon R., 2006, ApJ 641, 389
 4) Sánchez-Monge Á., et al., 2013, MNRAS 432, 3288
 5) Inoue T., Fukui Y., 2013, ApJL 774, L31
 6) Myers P. C., 2009, ApJ 700, 1609
 7) McKee C. F., Tan J. C., 2003, ApJ 585, 850
 8) Bonnell I. A., Bate M. R., Clarke C. J., Pringle J. E., 2001, MNRAS 323, 785
 9) Tan J. C., Kong S., Butler M. J., Caselli P., Fontani F., 2013, ApJ 779, 96
 10) Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F., 2011, ApJ 740, 74
 11) Beltrán M. T., Cesaroni R., Neri R., Codella C., 2011, A&A 525, A151
 12) Chen X, Shen Z.-Q., Li J.-J., Xu Y., He J.-H., 2010, ApJ 710, 150
 13) Kraus S., et al., 2010, Nature 466, 339
 14) Sánchez-Monge Á., et al., 2013, A&A 552, L10
 15) Machida M. N., Inutsuka S.-i., Msumoto T., 2008, ApJ 676, 1088
 16) Cunningham A. J., Klein R. I., Krumholz M. R., McKee C. F., 2011, ApJ 740, 107
 17) Hosokawa T., Omukai K., 2009, ApJ 691, 823
 18) Arce H. G., Shepherd D., Gueth F., Lee C.-F., Bachiller R., Rosen A., Beuther H., 2007, in Reipurth B., Jewitt D., Keil K., eds., Protostars and Planets V, Univ. Arizona Press, Tucson, p. 245
 19) Matthews L. D., Greenhill L. J., Goddi C., Chandler C. J., Humphreys E. M. L., Kunz M. W., 2010, ApJ 708, 80
 20) Motogi K., et al., 2008, MNRAS 390, 523
 21) Torrelles J. M., et al., 2011, MNRAS 410, 627
 22) Caswell J. L., Phillips C. J., 2008, MNRAS 386, 1521
 23) Motogi K., Sorai K., Niinuma K., Sugiyama K., Honma M., Fujisawa K., 2013, MNRAS 428, 349
 24) 元木業人, 2011, 博士論文 (北海道大学)
 25) Martí J., Rodríguez L. F., Reipurth B., 1995, ApJ 449, 184
 26) Motogi K., et al., 2011, MNRAS 417, 238

A Bottom-Up Study of an Active High Mass Protostellar Jet—A Way from an University Telescope to ALMA

Kazuhito MOTOGI

*The Research Institute for Time Studies,
 Yamaguchi University, 1677-1 Yoshida,
 Yamaguchi, Yamaguchi 753-8511, Japan*

Abstract: High mass stars are now believed to be formed via disk accretion. Detailed processes will be studied by ALMA in full-operation phase that can directly resolve an accretion disk. On the other hand, jets and outflows are other useful tools to study the innermost disk. We recently found highly time-dependent activities of a high mass protostellar jet near the driving source. Such a variable aspect of a circumprotostellar environment will become more common in ALMA era. In this report, we present the jet activities found in our observations, with a brief summary of the fundamental understanding of high mass star-formation.