

大質量星形成領域の 30 μm 帯での観測



内山 瑞穂

〈東京大学大学院理学系研究科 天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢2-21-1〉
e-mail: uchiyama@ioa.s.u-tokyo.ac.jp

形成時の大質量星は分子雲内に深く埋もれており、中間赤外線長の長波長側や遠赤外線帯で観測する必要があるがこれまで詳細な観測が困難であった。miniTAO/MAX38は中間赤外線の30 μm 帯の観測を地上から行うことのできる唯一の手段であり、この波長域で高い空間分解能を達成している。MAX38による大質量星形成領域M8Eの観測から、領域内の天体の形成開始時期に『ずれ』が生じているという結果が得られた。これは分子雲コアという狭い領域内での大質量星形成過程を考えるうえで、非常に興味深い結果である。

1. 大質量星とその形成過程

太陽質量の8倍以上の質量をもつ星は一般に大質量星と呼ばれ、銀河や宇宙の進化を考えるうえで非常に重要な天体である。大質量星の進化の過程の末期では炭素や酸素、金属などの重元素が放出される。これにより次に形成される星はそれ以前の星よりも多くの重元素を含むことにより、不透明度などの物理的な特性が変化する。また銀河全体で見ても、重元素が多い領域ほど星間物質内などにおいて効率的に重元素からの禁制線放射による冷却が効き、結果的にこうした現象は銀河進化に影響を及ぼす。さらに、大質量星が進化することに応じた水素電離領域の拡大や超新星爆発による衝撃波が新たな星形成を促すなど、大質量星は周辺環境に多大な影響を及ぼすと考えられている。このように、銀河、ひいては宇宙の進化を考えるうえで、大質量星の働きは無視できないのである。したがって、これらの大質量星がどのように形成され、進化し、そして消滅していくのか、という過程の解明は天文学において一つの重要な問題である。

しかし、大質量星がどのように形成されるのか

はいまだに詳細が不明である。銀河系内に大質量星が少ないために詳細な観測例が少なく、このため大質量星の形成に関する統一的な理論も存在しない。これは豊富な観測例があり、標準的な形成理論のモデルが存在している太陽質量程度の星に対して対照的な状況である。

観測例が少ないのは、そもそも銀河系内に大質量星が太陽質量程度の星に比べてずっと少ないことに加えて、大質量星ができつつある領域（大質量星形成領域）が可視光ではほとんど見えないことにもよっている。これは、中心の星からの放射は星の周辺に集まったダストやガスによってほぼ完全に吸収されてしまうからである。われわれが観測可能なのは主にこうした星周物質から赤外線や電波の形で再放射された光である。これにより、ごく若い大質量星形成領域を観測すると、可視光より短い波長では強い減光を受け、再放射が見える中間赤外線や遠赤外線に観測されるエネルギーのピークが見られる。

1.1 大質量星形成における課題

大質量星形成における大きな問題は二つある。一つはより軽い星と同様のメカニズム、同様の質量降着率（中心の星にどれぐらいの勢いでガスが

降ってくるか)で大質量星を作ろうとすると、その質量を集めきる前に主系列に達してしまった中心星からの強い輻射で質量降着が阻止されてしまうことが挙げられる¹⁾。これは何らかのメカニズムで大質量星の質量降着率を100倍から10,000倍以上に上げることで解消される。例えば、星の周りに光学的に厚いディスクを天体が形成したり、或いはクラスター中心部での競争的な質量降着によって達成させると考えられている。実際の大質量原始星の観測からも理論モデルと同程度の高い質量降着率が示唆されており、何らかのメカニズムで質量降着率が高くなっていると考えられる。

もう一つは、上記のように大質量原始星ができるさらに前の段階において、高密度な大質量のコアが多数の小質量コアに分裂してしまう問題がある²⁾。これは、簡単に説明すればジーンズ質量 M_J が小さいためである。ジーンズ質量とはある分子雲ガス内のガスの塊を考えたときに、そのガスの内部圧力と、ガスの塊の自己重力とが釣り合う質量のことである。ジーンズ質量よりも大きい質量のガス塊は、ガスの内部圧力が自己重力に勝てずに収縮が始まり、星形成が開始すると考えられる。ジーンズ質量は低密度で高温のガス雲であるほど大きくなるので、星形成が起きるような高密度で低温なガス雲ではジーンズ質量は典型的に小さく(太陽質量程度)、このままでは分子雲は大質量星を作る前にそれぞれが小中質量の塊に分裂してそれぞれが星形成をしてしまうことになる。したがって、何らかのメカニズムでこれが阻害される必要がある。

1.2 長波長赤外線観測によるアプローチとその課題

こうした大質量星形成における諸問題に観測的にアプローチするにあたり、個々の大質量原始星(原始星とは主系列に到達する前段階の星を指す)を詳細に観測することに加え、大質量星形成領域

を構成する個々の星についての情報を得て、領域全体の傾向や、天体間の相互作用などについて探ることも重要になってくる。個々の天体の総光度などの物理量を正確に見積もるためには、先に述べたように再放射が見える長波長側の中間赤外線や、遠赤外線(30–100 μm)の観測が重要である。さらに、大質量星形成領域は銀河系内でも比較的遠方にあるため、領域内の個々の天体を分離するためには高い空間分解能が必要である。例えば、比較的近傍の大質量星形成領域(2 kpc)で分子雲コアサイズ程度の大きさ(20,000天文単位ほど)を空間的に分解するためには、10秒角を切る空間分解能が要求される。

しかし、こうした波長域の観測手段はこれまで宇宙望遠鏡が主たるものであり、大口径化が困難なため高空間分解能の達成は課題であった^{*1}。一方で、地上望遠鏡は大口径化が比較的容易なものの、大気中の水蒸気による赤外線の吸収により、これまで25 μm よりも長波長側の波長域での安定した観測は困難であるとされてきた。

2. アタカマ1 m望遠鏡と中間赤外線観測装置MAX38

チリ北部にあるアタカマ砂漠は天文観測にとって非常に理想的な場所である。その中でも特にチャナントール山の山頂5,640 m地点(以後TAOサイトと呼ぶ)は中間赤外線の観測において貴重な場所である。TAOサイトは標高が高く乾燥しているため、大気中の水蒸気量が非常に少ない。これにより、現時点では地上において唯一安定して30 μm 帯(30–38 μm の波長域)の観測を行うことができる場所となっている(図1)。

われわれはTAOサイトに現地パイロット望遠鏡として口径1 m望遠鏡(miniTAO)を建設し、中間赤外線観測装置を搭載して運用中である。この中間赤外線観測装置Mid-infrared Astronomi-

*1 近年運用が開始されたハーシェル宇宙望遠鏡にてごく一部の波長域でこの性能が達成され成果が発表されつつある。

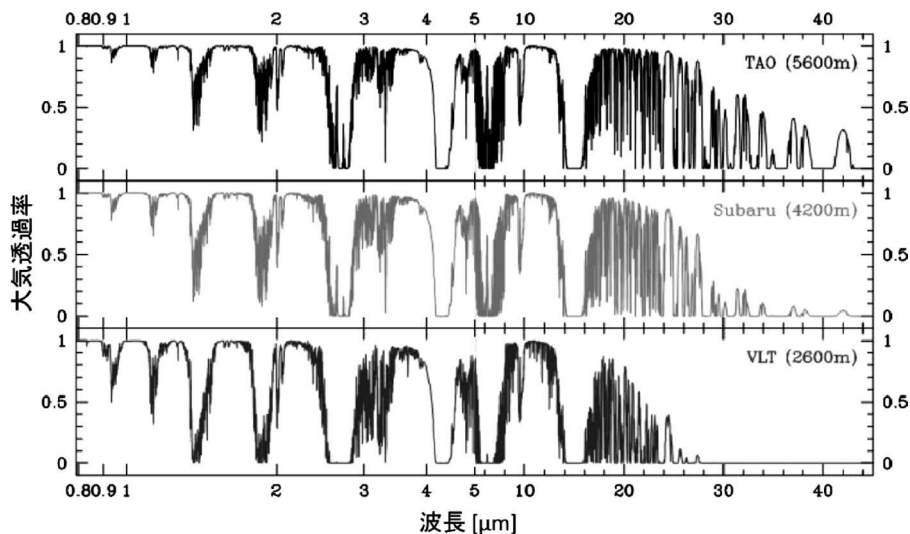


図1 VLT, すばる, TAOサイトの比較. 可降水量は下から順に6.0 mm, 1.0 mm, 0.5 mm. TAOサイトでは新たな大気の窓が開き30 μm 帯の観測が可能であることがわかる.

cal eXplorer 38 (MAX38) はこのTAOサイトの特徴を活かすため、38 μm までの観測に対応した装置となっている。miniTAOは主鏡口径1 mと地上望遠鏡としては小型である。しかしMAX38は30 μm で ~ 8 秒角、38 μm で ~ 10 秒角と、この波長域では宇宙望遠鏡に勝る空間分解能を達成している³⁾。miniTAO/MAX38を用いて筆者はこれまで大質量星形成領域の観測を五つ行い、現在も新たな領域に対する観測を継続中である。その初期成果として、今回はM8Eという領域についての観測結果を主に以下では述べたい。

3. 大質量星形成領域M8E

M8Eは干潟星雲M8の東部にある大質量星形成領域である。地球からの距離は1.5 kpcと大質量星形成領域の中では比較的近傍である。先行研究から、M8E領域は主に ~ 7 秒角(10,000天文単位)離れた二つの天体から構成されていることがわかっている⁴⁾。

一つは、M8E-IRという非常に若い天体である。この天体は近赤外線から中間赤外線にかけて非常に明るい天体であり、M8E領域の赤外線光

度の大半を占めている。M8E-IR (infrared) という名称もここからきている。先行研究からこの天体はまだ水素電離領域を形成していない前主系列の原始星段階であるとわかっている。もう一つはM8E-radioと呼ばれる若い天体である。こちらの天体は超コンパクト水素電離領域を有する天体で、主系列に達したばかりの天体であると考えられている。M8E-radioは近赤外線や短波長側の中間赤外線ではほぼ観測することができず、一方電波領域では強く輝いているので、このような名前前で呼ばれている。M8E領域の2天体はすばる望遠鏡による24.5 μm の中間赤外線の観測から、初めて2天体を分離して同時に撮像された^{5),6)}。

大質量原始星M8E-IRについてはその総光度が先行研究で求められている⁵⁾。しかし、分離撮像がなされた24.5 μm よりも長波長側では、M8E-IRとM8E-radioが未分離な観測データが使用されているため、真の総光度を求めるためには、より長波長側で2天体を分離撮像する必要がある。また、M8E-radioの総光度はこれまで直接的に求められていない。M8E-IRとM8E-radioの総光度を個別により正確に求め、そこから個々の天体の

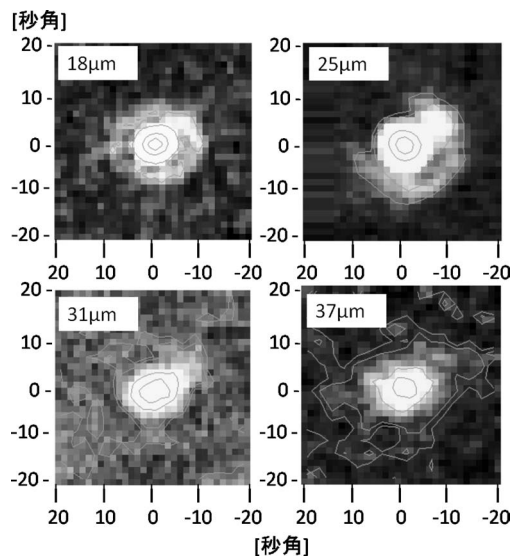


図2 MAX38で観測した18 μm 、25 μm 、31 μm 、37 μm のM8E領域の画像。画像の中心にあるのがM8E-IR。コントアはピークカウントの5%、10%、50%、80%である。

情報をさらに得るために、miniTAO/MAX38を用いた30 μm 帯を主とする観測を行った。

3.1 MAX38によるM8E領域の観測

2010年の秋と2011年の春の2回にわたり、MAX38でM8E領域の観測を実施した。観測は30 μm 帯(31 μm 、37 μm)のほか、先行研究との比較のためにより短波長側の中間赤外線(18 μm 、25 μm)でも観測を行った。

観測の結果を図2に示す。観測を行った四つの波長の画像をそれぞれ載せている。画像の中心部にM8E-IRがある。各画像で天体の周辺にリング状に広がった構造は回折パターンによるものであり、真の構造ではない点に注意して欲しい。それぞれの画像を比較すると18 μm ではほぼM8E-IRしか天体が見えないものの、25 μm ではM8E-IRの右上にもう一つ天体があることがわかる。二つ目の天体の位置は、ちょうどM8E-radioに対応するものであり、25 μm から顕著に見えるように

なった点からも、MAX38で検出したこの天体がM8E-radioであることを示唆する。31 μm と37 μm でも完全には2天体は分離できなかったものの、25 μm と同じ方向に伸びた構造を検出した。これはM8E-IRとM8E-radioからなる構造と考えられ、今回の観測で初めて30 μm 帯でM8E領域において2天体からなる構造の検出に成功した。

3.2 M8E領域内の各天体の素性

この観測結果を元に、M8E-IRとM8E-radioに対してそれぞれ測光を行った。31 μm と37 μm については、2天体を完全に分離した撮像ができていないため、それぞれ分離する処理を行ってから測光した。この測光値からそれぞれの天体の観測波長ごとのエネルギーを算出し、ここからさらに先行研究の他の波長での文献値も用い各天体の総光度を求めた。この結果、M8E-radioが1,000太陽光度程度、M8E-IRが最低でも7,000太陽光度程度の総光度をもつことがわかった。このうち、M8E-radioの総光度はMAX38の観測により初めて求められたものである。また、M8E-IRについても今回より正確に総光度の見積りを行うことができた。

今度は総光度から各天体の現時点での質量を導出する。各天体がちょうど主系列に到達した段階であると仮定すると、M8E-radioの質量は6太陽質量程度、M8E-IRの質量は12太陽質量程度になる¹⁾。M8E-radioはまさに現時点で主系列に達したばかりの段階であるので、この質量が最終的な質量であると考えられる。一方、M8E-IRはまだ原始星段階であり、今後もさらなる質量降着が進む可能性がある。したがって、この値は最終的な質量の下限值となっている²⁾。

4. M8E領域の成り立ちを探る

ここまでの解析から、M8E領域内のそれぞれ天体について新しく物理的な情報を得ることがで

*2 大質量星は質量降着が進む中でどんどん光度を増していくので、現時点の光度で求めた質量は下限値となる。

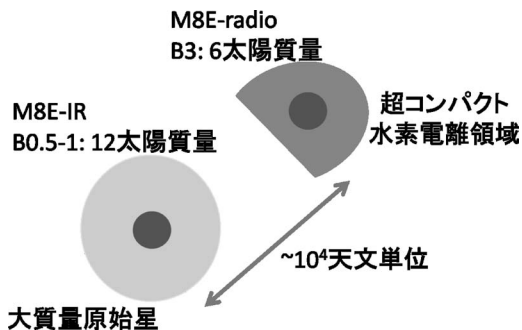


図3 MAX38の観測からわかった情報をもとにしたM8E領域の模式図。

きた。では、この結果から何がわかるのだろうか。M8E領域内の天体の情報についても一度整理してみると、以下のようにになっている。また、これを模式図として表したものを図3に示す。

- ・現時点で12太陽質量程度の重さの、前主系列段階の大質量原始星M8E-IR
- ・既に主系列に到達し6太陽質量程度の重さをもつ、超コンパクト水素電離領域を有するM8E-radio

つまり、領域内でより軽い星のほうが星の進化が進んでおり、より重い星のほうが星の進化が進んでいないことがわかる。これは興味深い結果である。一般的に、重い星のほうが星の形成にかかる時間は短い。つまり、仮に領域内で星の形成が一斉に始まったのなら、重い星のほうが進化が進んでいるべきである。しかしM8E領域内での結果はこれとは反対の状況になっている。これを説明するためには、より重い星の形成が始まるよりも前に、より軽い星の形成が始まらなければならない。これまで、大質量星が中心でできつつある星団（分子雲コアと比べて10倍以上の大きさ）ではこのように軽い星から先に形成が始まる、という現象が確認されている⁷⁾。しかし、個々の大質量星が形成されるM8E領域のような狭い空間

の中で、同様の形成開始時期のずれが見つかったのは初めてのことである⁸⁾。

では、この現象はどのような原因で引き起こされるのだろうか。M8E領域はちょうど分子雲コア程度の大きさをもった領域である。したがって、コア内での何らかの過程がこのような結果をもたらしたと考えられる。初めに述べたように、大質量星の形成において分子雲コアがそのままでは小中質量の塊に分裂してしまう、という問題がある。近年、この問題に対して観測がなされているほか、問題を解決する理論的なモデルも提唱されている。その中の一つに、最初に分裂した小中質量原始星が形成時に放つエネルギーによって分子雲コアが温められ、結果として領域内のジーンズ質量が増大し、大質量星の形成が可能になるというものがある⁹⁾。このモデルがもし正しいのなら、領域内では軽い星が先にでき、後から重い星が形成されることになる。今回のM8E領域の観測結果はまさにこの状況と一致し、観測的な支持を与えている。実際の星形成においては、星からの放射に加え、内部乱流や磁場などが複雑に影響するため、このモデルだけですべてを解決することにはならないだろうが、一つの示唆を与える結果を本研究では得ることができた。

4.1 今後の研究展望

同じような傾向は他の領域でも見つかってきている。われわれの観測でもM8E領域とは別の一つの領域で、M8E領域と同様に軽い星から先に形成が開始された結果が得られた。さらにサンプルを増やすべく、今後一年間でminiTAOを用いて5領域ほどの観測を行う予定である。

またわれわれは次期中間赤外線観測装置MI-MIZUKUを並行して開発中である^{*3)}。すばる望遠鏡とTAO6.5 m望遠鏡に搭載予定のこの次期装置によって、より暗く遠方にある大質量星形成領域の観測や、近傍大質量星形成領域のより詳細な

*3 本特集の小西・上塚の稿を参照。

観測が可能になる。30 μm 帯で1秒角に近い空間分解能を達成する次期装置は、電波干渉計の観測結果との直接比較を可能にするものであり、ダストに深く埋もれた大質量星形成領域の、謎に包まれた厚いベールの中をより深く探ることができることを期待している。

謝 辞

本観測を支えていただいたTAOチームの皆さん、そして研究に関してコメントをいただいたMAX38チームの皆さん、山下卓也氏に感謝いたします。本原稿の内容は筆者の修士論文、2012年秋季年会での発表内容をもとにしています。

参考文献

- 1) Zinnecker H., Yorke H. W., 2007, ARA&A 45, 481
- 2) Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F., 2007, ApJ 656, 959
- 3) Miyata T., et al., 2008, Proc. SPIE 7014, 701428
- 4) Simon M., Cassar L., Felli M., et al., 1984, ApJ 278, 170
- 5) de Wit W. J., Hoare M. G., Fujiyoshi T., et al., 2009, A&A 494, 157
- 6) Linz H., Henning T., Feldt M., et al., 2009, A&A 505, 655
- 7) Wang Y., Beuther H., Bik A., et al., 2011, A&A 527, A32
- 8) 内山瑞穂, 2012, 修士論文 (東京大学)
- 9) Krumholz M. R., McKee C. F., 2008, Nature 451, 1082

Observation of Massive Star Forming Region at 30 Microns

Mizuho UCHIYAMA

Institute of Astronomy, University of Tokyo, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

Abstract: Since massive young stellar objects (MYSOs) are deeply embedded in molecular clouds, observations at long mid-infrared and far-infrared wavelengths are essentially important. Our developed mid-infrared camera MAX38 attached on the mini-TAO telescope is useful for these studies because of its unique imaging capability at 30 microns with high spatial resolution. We have carried out observations of a MYSO forming region M8E with MAX38 and suggested that MYSOs in this region had not formed simultaneously.