

赤外線天文衛星「あかり」がとらえた 質量放出

植田 稔也

〈Department of Physics & Astronomy, University of Denver, 2112 E. Wesley Ave.,
Denver, CO 80208, USA〉
e-mail: tueta@du.edu



植田



泉浦

泉浦 秀行

〈国立天文台岡山天体物理観測所 〒719-0232 岡山県浅口市鴨方町本庄 3037-5〉
e-mail: izumiura@oao.nao.ac.jp

恒星からの質量放出は宇宙に存在する物質の成り立ちを考えるうえで欠かすことのできない重要な物理過程です。なかでも、小中質量星からの質量放出は、炭素、窒素、酸素といったわれわれに身近な元素の源なのですが、その物理過程はいまだに理論的によく理解されていません。この小中質量星からの質量放出によって形成される星周殻は塵に富んでいるため、非常に明るい赤外線源となります。そこでわれわれは、赤外線天文衛星「あかり」を使った小中質量星の星周殻撮像サーベイ観測を行い、星周塵の空間分布を明らかにして質量放出率の履歴を再現することで、小中質量星からの質量放出を観測的に理解しようとしています。本稿では、その最新成果と今後の展望について解説します。

1. 質量放出とは

「我々はどこから来たのか、我々は何か、我々はどこへ行くのか。」これは、後期印象派の画家、ポール・ゴーギャンの同名の作品の片隅に書かれている言葉です*1。この言葉はまた、天文学における究極の問いの一つでもあります。

この問いに答えを与える一つの方法がビッグバン宇宙論ですが、それによると、宇宙初期の火の玉の中で合成される元素は、水素、重水素、ヘリウム、そしてリチウムで、それよりも重い元素は合成されないことになっています¹⁾。つまり、宇宙が始まったときには、宇宙にはたったこれだけの元素しか存在していなかったのです。

しかし、われわれの知る宇宙はより重い元素に満ちあふれています。そもそもわれわれ人間自体が炭素、窒素、酸素などの元素からできていますし、われわれの住む地球の主要な構成元素はケイ素です。では、宇宙初期に存在しなかったこれらの元素は、どこからきたのでしょうか？これまでの恒星進化論の進展により、リチウムより重い元素はほぼすべて恒星の中で起きる核融合で合成されたことが明らかになりました²⁾。そして、合成されたさまざまな元素は宇宙空間へばらまかれ、星間物質となり、次世代の恒星となり、恒星の周りをめぐる惑星となり、その惑星に住むわれわれのような生命となったのです。

では、恒星内で合成された元素は、どのように

*1 http://www.mfa.org/collections/search_art.asp?recview=true&id=32558

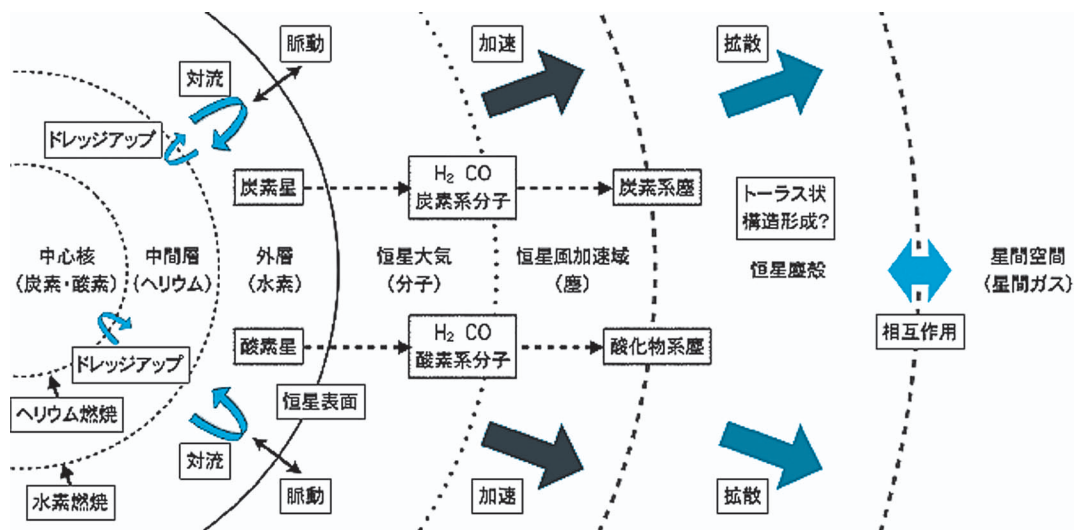


図1 漸近巨星枝星内部，その周辺の星周殻と星間空間の模式図。図内の異なる領域の相対的大きさについては，図のとおりでありませぬ。（参考文献4の図1.1から本稿用に翻訳，加筆。）

して宇宙空間へばらまかれたのでしょうか？ 現在の理解では，大質量星の超新星爆発と小中質量星^{*2}の星風という二つの「質量放出」過程が，宇宙空間への物質還元を主に担っていると考えられています³⁾。恒星が何世代にもわたって元素合成と質量放出を繰り返すことで，宇宙はさまざまな物質に満ちた空間へと成熟しました。この物質還元が起きていなかったら，われわれのような「もの」は宇宙に存在できなかったのです。したがって，恒星からの質量放出の理解は，宇宙での物質還元の発端を理解することにほかなりませぬ。

それでは，宇宙での物質還元の理解に必要な不可欠な質量放出という物理過程を，われわれはどのくらい理解しているのでしょうか？ 結論から先に言いますと，超新星爆発，星風，いずれの場合にも，質量放出過程は理論的に未解決です。観測によって質量放出率（1年当たりに放出される質量）などを見積もることは可能で，定性的な理解はできていますが，恒星の物理量の関数として質量放出率を定量的に導く理論は，いまだに確立していません。

そこでわれわれは，小中質量星からの質量放出についての理解を深めるため，提案される理論に直接制限を与えるような観測事実を得る研究を進めてきました。今回，われわれは赤外線衛星「あかり」の遠赤外線サーベイヤを使い，質量放出によりばらまかれた物質が星の周りに漂っている星周殻の直接撮像から，星の質量放出の履歴を探ろうとしています。研究はまだ進行中ですが，本稿では，小中質量星からの質量放出についての定性的理解をまとめ（2章），「あかり」での観測を紹介し（3, 4章），今後の展望を解説（5章）します。

2. 小中質量星からの質量放出

2.1 「塵」に富む小中質量星の星風

小中質量星では，進化の進んだ「晩期」にあたる赤色巨星期やその後の漸近巨星枝期（つまり，主系列星期より後で惑星状星雲期より前の段階）に星風が発達し，図1に示すように活発な質量放出が起きて星周殻が形成されることが観測的に知られています⁴⁾。晩期型巨星^{*3}の表面部分では，星の半径が大きいがゆえに重力が弱く，内部変化に

*² 一般に，太陽質量の約8倍より軽い恒星は小中質量星，それ以上の恒星は大質量星と定義されています。

*³ 進化した小中質量星である赤色巨星や漸近巨星枝星をまとめて晩期型巨星と総称します。

より表面が脈動(上下運動)した際に、時として表面物質が恒星の重力から解放されることがあります。そのような物質は星表面から離れていき、それに伴って冷えていきます。そうしたガスが拡散しきる前に温度を下げると、ガスの一部は固体微粒子に凝結します。このような固体微粒子は一般に塵(ちり)と呼ばれています。塵はガスに比べて不透明度が高いため、恒星からの光をより効率良く受けます。恒星の放射圧を受けた塵は外向きの運動量を獲得、そして塵が周囲のガスに衝突することで、外向き運動量がガス全体へと伝わります⁵⁾。こうして恒星表面を離れた塵に富むガスは、星からの放射圧を原動力として星風となるわけです⁶⁾。

その一方で、漸近巨星枝期の恒星内部では、炭素と酸素からなる中心核が発達し、それをヘリウムに富む層と水素に富む層がタマネギ状に包む構造ができます。そしてヘリウムから炭素を合成する核融合と水素からヘリウムを合成する核融合とがそれぞれの層の境界で起きます⁷⁾。このヘリウム合成と炭素合成はお互いに影響を及ぼしながらほぼ交代で起こることが理論的に明らかにされ、「熱パルス」として知られています⁸⁾。

熱パルスが起きると、核融合反応が起きている層の境界を越えるような対流が起こります。このような対流は、本来なら核融合反応で合成されたままそこにとどまっているはずの元素を、その層の境界より上に移動させます。一方で、晩期型巨星の外層は、温度が低く完全に電離していません。対流によるエネルギー輸送が支配的になっています。したがって、星中心部の核融合反応で新たに合成された元素は、上述の2種の対流によって星内部から表面へと一気にくみ上げられていきます。この複合的な作用こそ、恒星内部で合成された元素を宇宙空間へと還元するのに必要な物理過程で、「ドレヅアップ(くみ上げ)」と呼ばれています⁸⁾。

さて、小中質量星の星風は塵の生成によって引き起こされると考えられていますが、生成される

塵の性質は、恒星表面の元素組成とガスの凝結温度によって決まります。したがって、塵の性質は、恒星内部で合成されくみ上げられた元素の種類と量に左右されることとなります。特に漸近巨星枝期の星は、星内部から炭素・酸素がドレヅアップにより表面にくみ上げられた結果、炭素の存在量が酸素の存在量を上回ったかどうかで炭素星か酸素星かに大別され⁴⁾⁷⁾、これが塵の性質に決定的に影響します。漸近巨星枝星の表面では、まず炭素と酸素が結合して安定な一酸化炭素ガスとして残り、余った炭素または酸素が他の元素と結合するなどして塵を作ります。そのため、炭素星の星風では炭素に富む塵(すすのようなもの)が豊富になり⁹⁾、酸素星では酸素がケイ素と結合したケイ酸化合物に富む塵(砂のようなもの)が豊富になります¹⁰⁾。塵の性質が星風・質量放出に影響を与えますから、恒星内部からの元素のくみ上げが、星風を通して質量放出を左右することになるわけです⁶⁾。

2.2 星風が作る星周殻とその構造

こうして小中質量星は、漸近巨星枝期に塵に富む星風によって星周殻を形成していき、星風による質量放出が続く限り、星周殻は大きくなり続けます。しかし、星風によって星が表面物質を失っていくと、やがて星風の持続に必要な条件(温度、密度、重力加速度など)を満たさなくなり、質量放出は急速に弱まると考えられています。この段階で漸近巨星枝期は終了し、星周殻は星から切り離されて遠ざかっていきます。中心星としては、中心核の周りに水素に富む外層がわずかにへばりついたものが残り、星周殻が切り離された変化に対応するために収縮して表面温度を上げ、白色矮星へ進化していくと考えられています。この段階が前期惑星状星雲期で、中心星の温度は依然として星周殻内ガスを電離するほど高くないため、星周殻は塵に豊富なまま拡散を続けます¹¹⁾¹²⁾。中心星が収縮して温度が十分に高くなり星周殻ガスの電離が始まると、さまざまな輝線でその美しい姿

を魅せる惑星状星雲が誕生し、惑星状星雲期となります¹³⁾。

白色矮星の平均質量は太陽の0.6倍ほど¹⁴⁾なので、一つの小中質量星から最大で太陽質量のおよそ9倍もの量の物質が星間空間に放出されるわけです。しかし、平均的な星の質量放出率では、実際の進化過程にこれだけの量の物質を放出できないことは早々と問題視され、漸近巨星枝期末期に「スーパーウインド」という著しく激しい質量放出が起こる必要性が提案されました¹⁵⁾。このスーパーウインドは、恒星進化モデル数値計算の結果を星風モデル数値計算の初期条件として使うことで、恒星モデルの熱パルスに伴う星風現象として再現されました¹⁶⁾。しかしながら、いまだに観測事実としては確認されていません。

一方、漸近巨星枝期初期には星はほぼ球体と考えられており、その星からの質量放出もほぼ球対称に起きると予想され、実際に球対称な星周殻が一酸化炭素ガスの放つ電波輝線により観測されています¹⁷⁾。しかし、それよりもっと進化した段階にある惑星状星雲の形状やガス運動の観測からは、実に8割以上の惑星状星雲が非球対称な構造を見せていることがわかっており¹⁸⁾、それらが単に漸近巨星枝期の星風の過去の名残ではないことを示しています。そこで、惑星状星雲期初期に復活するとみられる「速い星風」が、漸近巨星枝期に星周殻を形成した星風に追いついて相互作用することで、観測的に知られている掃き寄せられたような惑星状星雲の構造を形成するという、「星風相互作用理論」が提唱されました¹⁹⁾。

ところがこの理論では、漸近巨星枝期の星風が赤道面上に偏った密度分布（ドーナツ状のトーラス構造）をもつ星周殻を作ることが前提とされ²⁰⁾、そのような非球対称な構造がそもそもどうして発生するのかについては、言及されませんでした。そのため、漸近巨星枝期のトーラス状星周殻の起源を探るべく、前期惑星状星雲の撮像サーベイ観測が行われました。前期惑星状星雲はまだ

電離していないため輝線では観測できませんが、星周殻内の塵は中心星からの可視光や近赤外線を散乱して反射星雲として見えます。また、星周殻は中心星の光を効率良く吸収して温まり、一番内側で絶対温度200度（摂氏マイナス70度）ほどになっているため、中間赤外線（波長10-20マイクロメートル）で熱的赤外線を放射します。そこで、前期惑星状星雲の中間赤外線での直接撮像²¹⁾、可視・近赤外線域での間接撮像サーベイ²²⁾が行われました。その結果、漸近巨星枝期が終わるまでに、星周殻は（おそらくスーパーウインドによって）すでにトーラス状になっていることと、星周殻の密度の違いがその後の惑星状星雲の形態（双極型と楕円型、密度が高いほど双極度が高くなる）の違いに体现されることとが明らかになりました。また、双極ジェットが存在が示唆されるような複雑な構造をもつ前期惑星状星雲が存在することもわかりました²³⁾。

なお、前期惑星状星雲の一酸化炭素分子ガス輝線サーベイでは、星周殻が塵への放射圧で得られる運動量だけでは賄いきれない運動量をもつことが明らかになりました²⁴⁾。これは「星風運動量不足問題」として今日でも謎のまま、理論を構築するうえでの大きな障害になっています²⁵⁾。

3. 星周殻が記憶する質量放出の履歴

星周殻の構造についておさらいすると、漸近巨星枝期終盤での熱パルスによるスーパーウインドの出現とそれに伴う（と考えられる）星風内のトーラス状構造の発生の2点が、理論上重要にもかかわらず観測で確認されていない課題ということになります。そしてこれらの点は、質量放出率の変化が引き起こす星周殻内の密度分布の変化、という形で観測可能になります。

なぜなら、星周殻の密度分布を中心星からの距離（半径）の関数として考えた場合、星風の風速は一定という仮定において、半径は時間と比例（半径＝風速×時間）しますから、星周殻内の密度

分布は質量放出率の時間履歴を意味するからです。つまり、星周殻の密度分布を外向きにたどっていき、漸近巨星枝星期終盤に当たる部分の密度分布がどう変化していくかを観測することで、星周殻の構造発生現場を押さえることができる、ということです。しかし、そのためには、広がった星周殻を撮像する必要があり、そのためには、低い温度（絶対温度数十度＝摂氏マイナス200度ほど）で熱的放射をする塵を観測できる遠赤外線域帯（波長100マイクロメートル程度）を使う必要があります。

実際、1980年代に運用された米英蘭による世界初の赤外線衛星IRAS（アイラス）による全天サーベイデータでは、遠赤外線域で空間的に広がりをもつと思われる晩期型星が多数確認されました²⁶⁾。そして、その後開発された高度な画像処理技術によって、そもそも原理的に空間分解能が低い遠赤外線域でも星周殻の構造を議論することが可能になり^{27), 28)}、1990年代に運用された欧州宇宙機構の赤外線衛星ISO（アイソ）では、遠赤外線域で星周殻の構造が空間分解されました²⁹⁾。

今回のわれわれの「あかり」を使った指向観測では、144個の晩期型星の星周殻を、遠赤外線4バンド（波長65, 90, 140, 160マイクロメートル）においてこれまでで最高の空間分解能（例えば波長90マイクロメートルで40秒角）で撮像しました³⁰⁾。最近の塵生成・破壊を含む星風の数値モデルでは、珪酸化合物系の塵では十分な運動量を得られないという結果も出ていましたが³¹⁾、われわれの「あかり」の結果は、晩期型星は表面の化学組成にかかわらず、星風によって星周殻を形成することを明らかに示しています。「あかり」データの解析は現在も進行中ですが、IRASやISOのデータから示唆されていた中空な星周殻構造を、今回ははっきりと確認することができました（図2）。

また、IRASデータの画像処理により、二重の中空殻構造が示唆されていた（すなわち、空間的に分解された殻の内側に、空間分解されていない

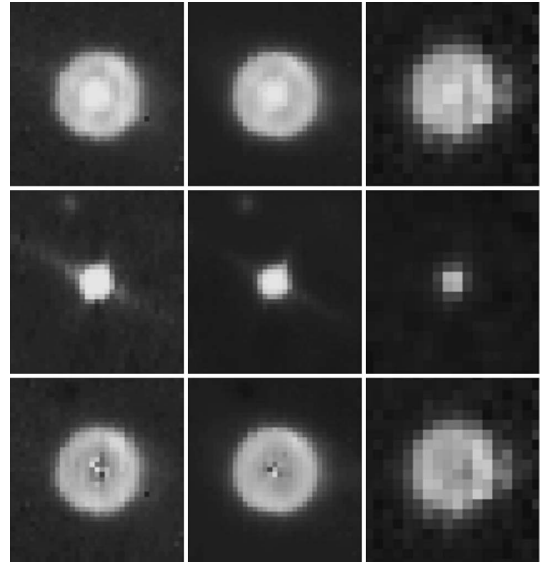


図2 「あかり」で捕らえた漸近巨星枝星うみへび座U星の星周殻（左から波長65, 90, 140マイクロメートルの画像）。上段は中心星も含めた画像。下段は、標準星データ（中段）を使って中心星を除く処理をした画像。画像の大きさはそれぞれ8.75分角。

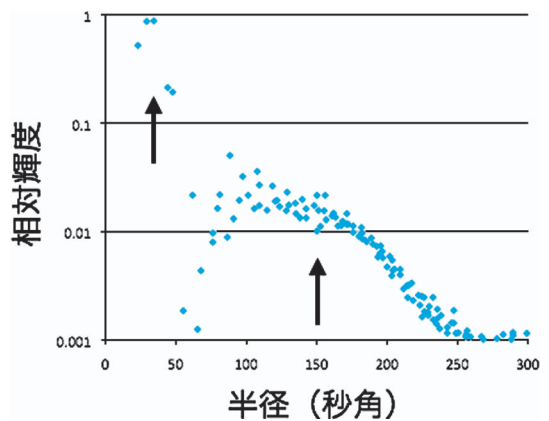


図3 星周殻構造が見えるように処理をしたポンプ座U星の波長90マイクロメートル「あかり」画像（表紙）から作った輝度プロット。およそ30秒角と150秒角の半径をもつ二つの中空殻構造が空間分解できている。

が遠赤外線放射のわずかな広がりからもう一つの殻構造の存在が推測されていた）ポンプ座U星において²⁹⁾、両者が実際に存在し、かつ、中空構造であることを確認しました（図3）。これは複数

の中空星周殻を同時に空間分解した初めての例であり、「あかり」の空間分解能ならではの成果です。

データの分析はこれから詳細を詰めていく段階ですが、ポンプ座U星までの距離と星周殻の膨張速度において、二つの中空殻はおよそ8,000年の間隔をおいて発生したことになります。この二つの中空殻がともに熱パルスに起因するものとしてモデル計算³²⁾と照らし合わせると、ポンプ座U星は太陽質量のほぼ2倍の質量をもつ漸近巨星枝星ということになります。さらに、星周殻の密度分布はすでに非球対称性を見せているので、今後のさらなる分析で星風内の構造の萌芽について新たな知見を得ることが期待できます。

4. 星周殻と星間物質の境界

「あかり」観測の結果にはまた、当初予期していないものもありました。その一つが、遠赤外線星周殻が検知された場合、中心星が星周殻の中心に位置していない場合がままあるという事実です。この中心星と星周殻の「ずれ」は非等方な質量放出、もしくは、星間ガスとの相互作用によるもの、と考えることができます。そして多くの場合、中心星のずれている方向は、中心星の固有運動の方向とほぼ一致しています。その場合、星間ガスとの相互作用によって星周殻が一方に押された、と考えるのが妥当です。

星風の速度が速い大質量星が質量放出しながら星間空間を移動している場合、星風と星間ガスとの相対速度は十分大きく、星風と星間ガスの境界面に衝撃波（バウ・ショック）が起こります。そのような場合、星風と星間ガスの境界部にある塵が何らかの原因で温められ、熱的遠赤外放射を起こすことは可能です。事実、IRASの観測でそのような例が大質量星の周りに発見されました³³⁾。今回われわれは、「あかり」を使ってオリオン座の赤色超巨星ベテルギウスの周りに弧状に広がる衝撃波を細部にわたって観測しました³⁴⁾。

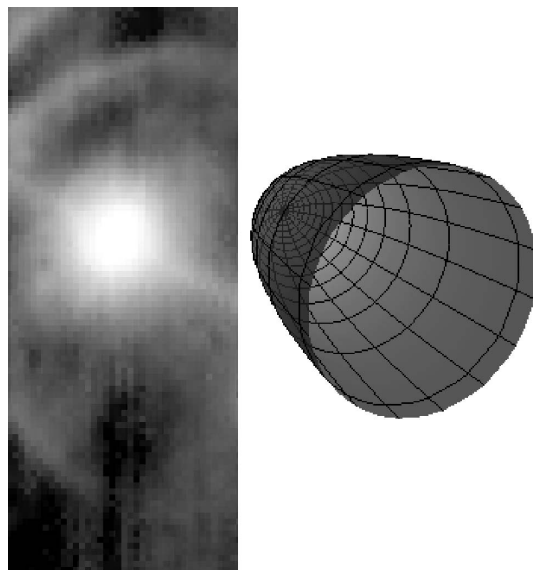


図4 弧状衝撃波が分解されたベテルギウスの「あかり」波長90マイクロメートル画像(左)とその形から予想される弧状衝撃波面の3次元の向きの模式図(右)。「あかり」画像の幅は9.5分角。

弧状衝撃波の形状は理論的に求めることが可能³⁹⁾で、「あかり」の画像から得られる見た目の形状と比較することで、衝撃波の3次元の向きを求めることが可能です。また、ベテルギウスの固有運動、視線速度、距離から、星自身の3次元での進行方向も求められます。直感的には双方の数値は一致するはずと考えがちですが、実際は観測誤差に対し有意に異なっています。これはいったいなぜなのでしょう？この違いは、星間物質もわれわれからみて動きのある流れになっている、と考えることで解決できます。ベテルギウスの場合、星間ガスの密度の見積もりがあるので、秒速43 kmで流れる星間ガスをベテルギウスが秒速32 kmで横切るために、星風と星間ガスの相対速度が秒速89 kmにもなることが導かれます³⁴⁾。そのため強い衝撃波が発生し、温められた塵が遠赤外線観測されたと結論できました(図4)。

「あかり」に先駆けて運用が始まった米国の赤外線衛星 Spitzer (スピッツァー) でも、われわれ

の「あかり」観測同様、空間的に広がった星周殻からの微弱な遠赤外放射を検知する試みは行われました。その結果、直感的には星風と星間ガスの相互作用が比較的弱いと考えられる小中質量星の漸近巨星枝星うみへび座 R 星の周りでも、同様の弧状衝撃波が見つかりました³⁵⁾。Spitzer のうみへび座 R 星画像の衝撃波の形から導かれる位置角は(北から)マイナス 62 度、傾斜角は(遠ざかる向きに) 59 度。一方で、中心星の固有運動から導かれる空間速度ベクトルは位置角マイナス 77 度、傾斜角 13 度です。このずれは、星間ガスが最低でも秒速 45 km の速度(実際の速度はガス密度に依存する)で流れていることを意味します。星風速度が秒速 10 km としても、星風と星間ガスの相対速度は簡単に秒速 50 km を超えるため、結果として衝撃波ができると考えてよいことがわかりました³⁷⁾。

残念ながら、観測可能な天域の制限のため、うみへび座 R 星に「あかり」を向けて観測することはできませんでしたが、われわれの「あかり」データの中には、うみへび座 R 星と同様の弧状衝撃波のような構造を見せる晩期型星がいくつも見つかっています。晩期型星の星風は塵に富んでいるため、晩期型星の周りでのこのような弧状衝撃波が起きていれば(もちろん衝撃波が起きるためには星風と星間ガスが十分な速度でぶつかっていない必要があります)、温まった塵による遠赤外線放射を比較的容易に検知できると考えられます。

このように遠赤外線で見える星周殻と星間ガスの相互作用が見えているということは、星風と星間ガスがどういう出会い方をして、どのように混ざり合っていくのか調べられるということです。そのような観測例がいくつもあるために、宇宙に存在する物質の還元についてももう一步踏み込んで問

かけていき、その答えを見つけていくことができるといわけです。これは、恒星分野と星間物質分野をつなぐ新たな研究手法の確立と言えるでしょう。これはまた、星間ガスの運動学を研究する新たな手法とも言えます。

5. 今後の展望

われわれはまだ「あかり」データの分析を始めたばかりですが、世界的な遠赤外線での観測環境を見ると、うかうかしてられません。というのも、欧州宇宙機構の新赤外線衛星 **Herschel** (ハーシェル)^{*4} が先日打ち上げられ、「あかり」の約 5 倍の口径での観測を今にも始めようとしているからです。これは逆に言えば、**Herschel** による新たな発見が期待できるということで、実際、我々が「あかり」で行ったような晩期型星の観測(撮像・分光)の観測プログラムが既に組まれています。

IRAS や **ISO** から「あかり」への技術的進歩と、「あかり」から **Herschel** へのそれはほぼ同様と考えられるため、「あかり」でそれ以前の研究での示唆を確認したように、**Herschel** は「あかり」による研究での示唆を確認することになるだろうと思います。そのため、**Herschel** の晩期型星プログラムのデータ解析が始動するまでに、われわれはほぼ研究を終えねばなりません。

それ以降も、**NASA** (米国航空宇宙局) の成層圏赤外線望遠鏡 **SOFIA** (ソフィア)^{*5} が 2014 年には科学的観測を始める予定になっており、日本の次世代赤外線衛星 **SPICA** (スピカ)^{*6} も 2017 年打ち上げ予定になっています。こういった次世代の観測機器では、空間分解した塵の分光などが進展し、小中質量星の質量放出の要でありながらも、現時点ではその正体がわかっているとはいえない塵の縮合・崩壊などの物理・化学反応の理解が増強され、自己無撞着な形での質量放出理論

*4 <http://herschel.esac.esa.int/>

*5 <http://www.sofia.usra.edu/>

*6 http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/index_j.html

の形成が進展していくことが期待されます。

謝 辞

本研究は、「あかり」ミッションプログラム“Excavating Mass-Loss History in Extended Dust Shells of Evolved Stars (MLHES)”として、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部の山村一誠准教授を中心に、多くの共同研究者の方々とともに進められたものです。また、「あかり」データの解析においては、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部の白旗麻衣研究員にたび重なる助言をいただいた旨を特筆しておきます。

参考文献

- 1) 佐藤勝彦, 二間瀬敏史(編), 2008, 「宇宙論 I 宇宙のはじまり」, 日本評論社
- 2) 野本憲一, 定金晃三, 佐藤勝彦(編), 2009, 「恒星」, 日本評論社
- 3) Sedlmayr E., 1994, in IAU Colloq. 146, Molecules in the Stellar Environment, ed. Jørgensen U. G. (Springer-Verlag, Berlin) p. 440
- 4) Habing H. J., Olofsson H. (ed.), 2003, Asymptotic Giant Branch Stars (Springer-Verlag, Berlin)
- 5) Kwok S., 1975, ApJ 198, 583
- 6) Gail H.-P., et al., 2009, ApJ 698, 1136
- 7) Herwig F., 2005, ARA&A 43, 435
- 8) Iben I. Jr., 1995, Physics Report 250, 2
- 9) Speck A. K., et al., 1999, ApJ 513, L87
- 10) Waters L. B. F. M., et al., 1996, A&A 315, L361
- 11) Kwok S., 1993, ARA&A 31, 63
- 12) Van Winckel H., 2003, ARA&A 41, 391
- 13) Kwok S., 2000, The Origin and Evolution of Planetary Nebulae (Cambridge Univ. Press, Cambridge)
- 14) Kepler S. O., et al., 2007, MNRAS 375, 1315
- 15) Renzini A., 1981, in Physical Processes in Red Giants, eds. Iben I. Jr., Renzini A. (Reidel, Dordrecht) p. 431
- 16) Steffen M., et al., 1997, A&AS 126, 39
- 17) Habing H. J., Blommaert J. A. D. L., 1993, in IAU Symp. 155, Planetary Nebulae, eds. Weinberger R., Acker A. (Kluwer, Dordrecht) p. 243
- 18) Zuckerman B., Aller L. H., 1986, ApJ 301, 772
- 19) Kwok S., et al., 1978, ApJ 219, L125
- 20) Balick B., 1987, AJ 94, 671
- 21) Meixner M., et al., 1999, ApJS 122, 221

- 22) Ueta T., et al., 2000, ApJ 528, 861
- 23) Sahai R., et al., 2007, AJ 134, 2200
- 24) Bujarrabal V., et al., 2001, A&A 377, 868
- 25) Balick B., Frank A., 2002, ARA&A 40, 439
- 26) Young K., et al., 1993, ApJ 409, 725
- 27) Izumiura H., et al., 1995, Ap&SS 224, 495
- 28) Izumiura H., et al., 1997, A&A 323, 449
- 29) Izumiura H., et al., 1996, A&A 315, L211
- 30) Izumiura H., et al., 2009, in AKARI-A Light to Illuminate the Misty Universe, ed. Onaka T., et al. (ASP, San Francisco) in press
- 31) Woitke P., 2006, A&A 460, L9
- 32) Vassiliadis E., Wood P. R., 1993, ApJ 413, 641
- 33) Van Buren D., McCray R., 1988, ApJ 329, L93
- 34) Ueta T., et al., 2008, PASJ 60, S407
- 35) Ueta T., et al., 2006, ApJ 648, L39
- 36) Wilkin F. P., 1996, ApJ 459, L31
- 37) Ueta T., et al., 2009, in AKARI-A Light to Illuminate the Misty Universe, ed. Onaka T., et al. (ASP, San Francisco) in press

Investigations into Mass-Loss Histories with AKARI Infrared Astronomical Satellite Toshiya UETA

Department of Physics & Astronomy, University of Denver, 2112 E. Wesley Ave., Denver, CO 80208, USA

Hideyuki IZUMIURA

Okayama Astrophysical Observatory, National Astronomical Observatory, Kamogata, Asakuchi, Okayama, 719-0232, Japan

Abstract: Mass loss from evolved stars is an absolutely essential physical process for the existence of most of the matter in the universe. However, our theoretical understanding of this important process is still vague at best. We have been investigating into mass loss histories by observationally understanding spatial variations of the dust distribution in the circumstellar shells of mass losing evolved stars. In this article, we will review our recent results based on observations with the AKARI infrared astronomical satellite and summarize prospects in the near future.