

論文の内容の要旨

A study on extrasolar cometary source populations with the AKARI far-infrared all-sky survey

(『あかり』遠赤外線全天観測データを用いた系外彗星雲の研究)

氏名 有松 亘

本論文では、赤外線天文衛星『あかり』に搭載された遠赤外線サーベイヤー(FIS)による全天サーベイ観測データを用いて、太陽系での散乱円盤およびオールト雲に相当する、系外彗星雲からの遠赤外放射の探査を行い、検出された赤外放射の有意性および起源について議論する。

彗星は太陽系外縁部に位置するオールト雲および散乱円盤から飛来してきていると考えられている。本論文で彗星雲(Cometary Source Population: CSP)と定義されるこれらの天体群は、原始太陽系円盤に存在していた原始微惑星が、木星や海王星などの外惑星による重力的に散乱されたプロセスを経て形成されたと考えられている。したがって、彗星雲の存在は外惑星の形成過程や原始太陽系円盤の散逸過程と関連があると考えられている。太陽系外の恒星系周囲において彗星雲に類似する、原始惑星系円盤の典型的サイズ (~1000 天文単位以下) を超越した規模の天体群構造の存在を明らかにすることは、恒星系外縁部の典型的な特性を得るだけでなく、恒星系の典型的な形成進化プロセスや、一般的な星形成の枠組みの中での太陽系の特殊性および普遍性を理解する上で鍵となりうる。しかしながら、系外恒星系における彗星雲構造についての観測的理解はこれまでほとんど得られていなかった。

彗星雲に位置する天体やダストは中心星からの光球放射や星間放射を吸収し、得たエネルギーを遠赤外域で再放射していることが推定される。したがって恒星周囲の、彗星雲に相当する距離に分布する遠赤外放射を検出することで、系外彗星雲の存在に制約を与えることができる。よって本論文では『あかり』FISの全天サーベイ観測データから作成された、遠赤外(波長 65, 90, 140 ミクロン)全天マップを利用し、恒星周囲の遠赤外放射の探査を行った。系外彗星雲からの放射は中心星の光度が大きくなるにしたがって強くなるため、より光度の大きいタイプの恒星周

圏では彗星雲からの遠赤外輻射をより容易に検出できることが推定される。したがって本研究では、近傍の恒星の中で比較的高光度なA型星を観測対象に設定した。さらに、微弱な遠赤外輻射をより高感度で検出するために、本研究では遠方宇宙の研究で用いられるスタッキング解析の手法を採用した。スタッキング解析は、観測対象に位置を合わせた画像を加算平均合成することにより、ノイズに埋もれた微弱な輻射を検出する解析手法である。このスタッキング解析手法をFISマップに適用することにより、A型星に付随する輻射の検出を試みた。

マップ上の系外彗星雲のような、点源サイズの天体に対して正確な測光を行うためには、FISマップが点光源に対してキャリブレーションされていることが要求される。しかし、FISマップはこれまで拡散光に対してのみキャリブレーションされていた。加えて本研究ではスタッキング解析手法を用いてマップ上の検出限界以下の光源の測光なども行うため、検出限界以下の明るさをもつ微弱な光源に対してもキャリブレーション結果が適用できることを確認する必要がある。したがって微弱な点光源に対する追加のキャリブレーションを、FIS全天マップのデータを用いて行った。既知の赤外標準星をフラックスごとに分けてスタッキング解析を実行し、検出限界の1/10程度までのフラックスの点源からの信号特性を調べた。スタックした画像から標準星の動径方向の輝度プロファイルを導出し、点像分布関数(PSF)の動径プロファイルのようすを調べた。その結果、90ミクロンではPSFの動径プロファイルが、0.06 - 12 Jy の範囲で光源のフラックスに依存することなく求まることが確認された。さらに、フラックス別にスタックした画像ごとに開口測光を行い、予想されるフラックスと開口測光値との比較を行った。開口測光から得られたフラックスと予想フラックスの商からキャリブレーション係数を導出した。各フラックス領域でのキャリブレーション係数は65, 90, 140 ミクロンの波長バンドでそれぞれ9, 3, 20 %程度のばらつきはあるものの、フラックス依存性は認められなかった。

以上のキャリブレーション結果を用いて、FISマップに対してスタッキング解析を行った。Hipparcos星表と近・中間赤外観測衛星 WISEの近・中間赤外点源カタログ、およびFISの観測データに基づいて太陽から158 pc以内のA型星を計3763天体を選択し、距離別に3つのグループに分別してそれぞれスタッキング解析を行った。このうち彗星雲輻射が空間分解されることが期待される、最も近傍 (15.8 - 39.8 pc) のグループのスタック画像に対しては、恒星からおよそ2600

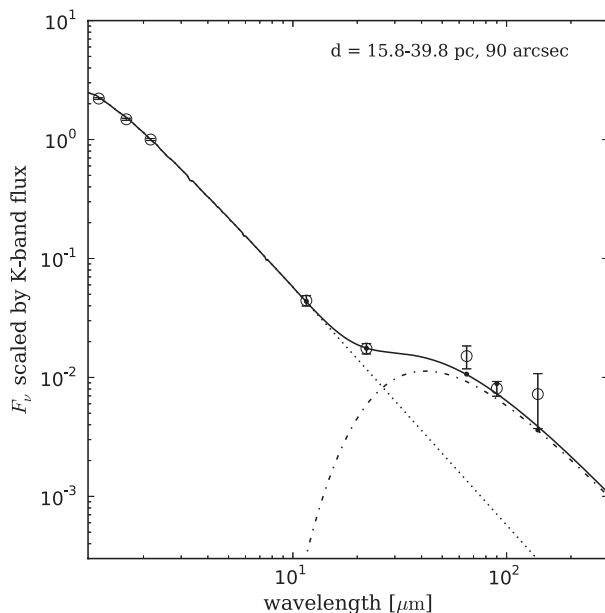


Fig1a. 15.9-39.8 pc に位置するA型星をスタックして得られた、中心(90 arcsec以内)の空間分解されていない成分の赤外輻射スペクトル。光球輻射成分(点線)に加えてデブリ円盤からの輻射に相当する赤外超過成分(一点鎖線)がみられる。

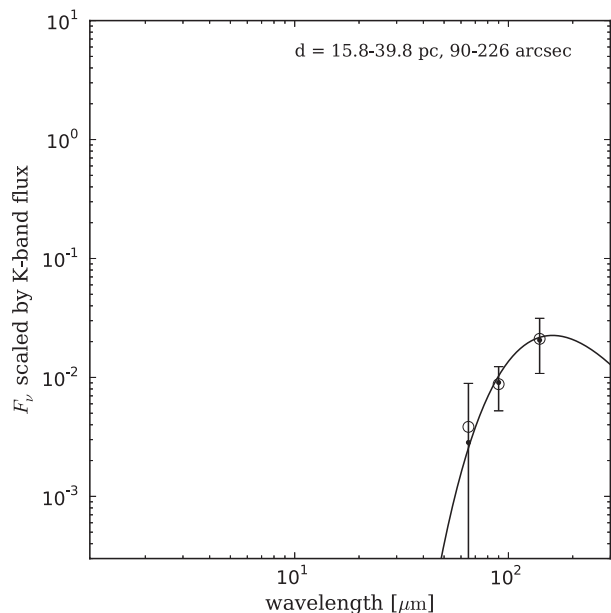


Fig1b. Fig1aと同じスタック画像における、90-226 arcsec の円環領域から輻射される低温超過成分の赤外輻射スペクトル。T=23Kの灰色体輻射のスペクトルで近似されることがわかる。

AU 以内の空間分解できていない中心領域 (~ 90 arcsec 以内) と、90-226 arcsec の円環に相当する星周領域とに分離して測光を実施した。中心領域の輻射成分のフラックス値は2MASS 近赤外点源カタログおよびWISEカタログと比較を行い、遠赤外域にて恒星の光球成分に対して超過輻射を持つことを確認した (Fig1a)。超過成分の輻射スペクトルは温度約120K、および fractional luminosity (光球輻射に対する超過成分のエネルギー比) 5×10^{-5} の黒体輻射成分で近似されることが分かり、これは既知のデブリ円盤の典型的な値と類似している。よって中心領域の遠赤外輻射は光球とデブリ円盤からの輻射であると推定される。いっぽうで、より遠方の星周領域からも遠赤外輻射が検出された (Fig1b)。一温度の熱輻射スペクトルでfitを行うと、この輻射の輻射スペクトルは温度約23K、fractional luminosity $\sim 10^{-5}$ の灰色体輻射で近似される。この低温超過輻射のより詳細な空間分布を得るために、スタック画像の動径方向の輝度プロファイルを作成し、PSFのプロファイルと比較を行った。その結果、およそ120 - 200 arcsec 付近にプロファイルの超過がみられることが分かった (Fig2)。実距離に換算すると、この超過成分はおよそ5000 AU 程度の広がりを持っていることがわかった。これは、既知のデブリ円盤 (1000 AU 以内) と比較しても遥かに大きな構造に相当する。

観測された低温超過成分には、背景の赤外天体等の混入の影響が含まれている可能性がある。低温超過成分の偽検出の可能性を検証するため、以下のテスト解析を実施した。まず、背景の点光源の混入の影響が比較的小さいと考えられる中央値でのスタッキング解析を実施した。その結果、中央値でのスタッキングでも平均値でのスタッキングと同様の低温超過輻射が検出されるこ

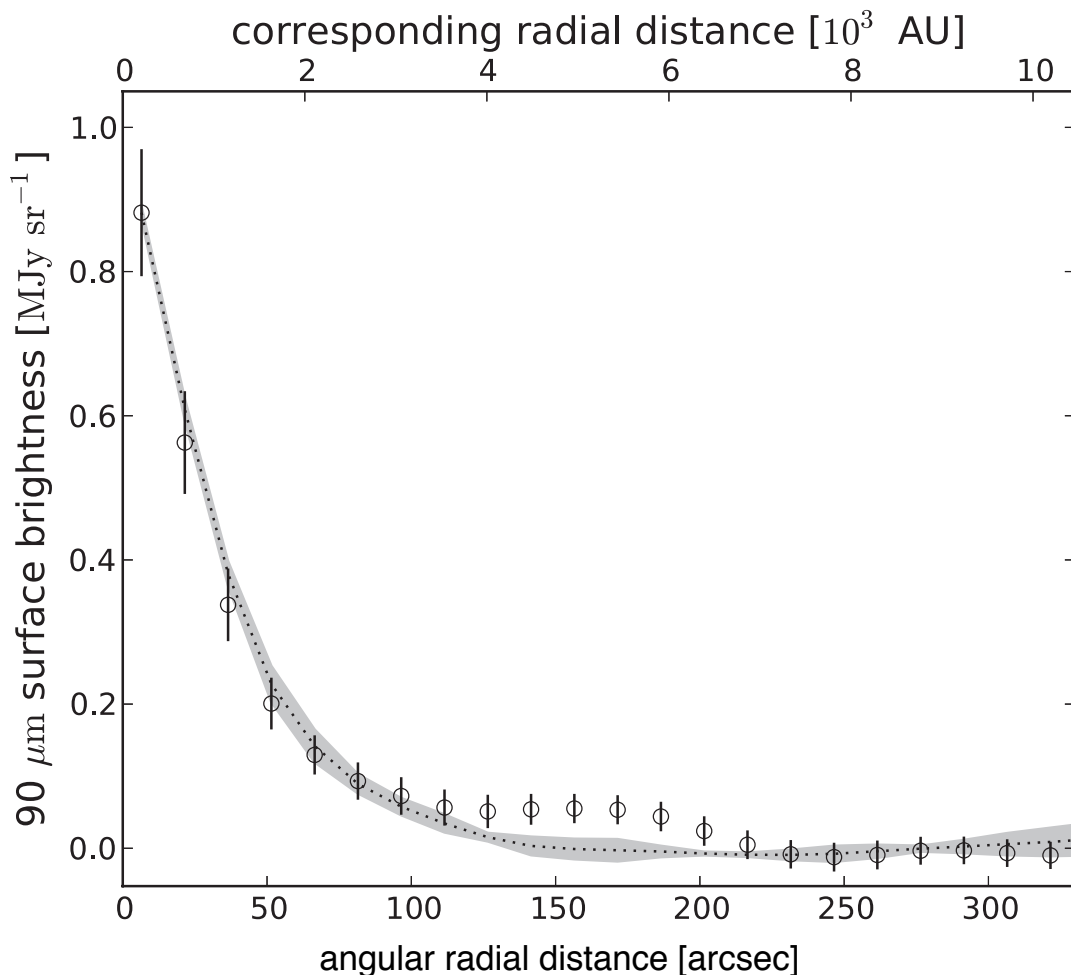


Fig2. 15.9-39.8 pc に位置するA型星のスタック画像の、90ミクロンの動径方向の輝度プロファイル。PSFのプロファイル(エラー灰色領域付き点線)とくらべ、およそ120 - 200 arcsec (実距離にして約4000 - 6500 AU に相当)の領域に超過成分が見られる。隣り合うデータ点同士はPSFによるシグナルの拡散のために従属的であることに注意。

とを確認した。また、対象を2分割してそれぞれのグループごとスタックした結果、いずれのグループからも同様な強度の低温超過成分が検出された。これらの結果を考慮すると、観測された低温超過成分は背景の点光源や、一部の特異的なサンプルに起因するものとは考えにくい。これらの解析に加え、検出された低温超過成分の輻射強度が、背景のフラックスのばらつきに対してどの程度有意であるかを評価するために、ランダムに選択した領域をスタックして測光して得たフラックスのばらつきを、低温超過成分の強度と比較した。その結果、A型星で検出された低温超過成分の強度は、背景測光のばらつきと比較して最大でおよそ 2.5σ 程度の超過に相当することがわかった。さらに動径方向プロファイルに対してもテスト解析を行った。具体的には、スタック画像を4領域に分割し、それぞれの領域での動径方向プロファイルを導出し、超過成分か検出できるかをテストした。その結果、いずれのプロファイルでも共通する超過成分が確認された。この結果は動径プロファイルの超過成分がスタックした恒星に付随する星周成分であることと矛盾しない。

検出した低温超過成分が星周ダストからの輻射であると仮定したうえで、スタックした恒星ごとの距離と輻射強度を考慮したダスト粒子輻射モデルを作成し、観測された輻射スペクトルと比較した結果、観測された低温超過スペクトルはマイクロサイズの半径を持つ、総質量0.1地球質量程度のダストからの輻射によって説明可能であることが示された。典型的な星間環境を仮定すると、彗星雲領域に存在するマイクロサイズのダストは星間磁場のローレンツ力によっておよそ 10^6 年ほどで拡散すると予想される。これはA型星の典型的な年齢 ($10^8 - 10^9$ 年) と比べると非常に短いため、観測されたダストは10 - 100地球質量以上の総質量を持つ天体群から供給されていることが示唆される。この質量は太陽系のオールト雲の質量に匹敵する。供給プロセスは彗星雲天体同士の相互衝突、星間ダストと彗星雲天体の衝突、もしくはその他の散発的なイベントなどが考えられる。よって本研究で得られた低温超過成分が系外彗星雲星周ダストからの輻射であると解釈すると、太陽系での散乱円盤やオールト雲のような彗星雲形成が一般的な恒星系形成シナリオの中で特異的ではないプロセスであることを示唆している。