

論文の内容の要旨

論文題目

An Infrared Study of Ices around Young Stellar Objects in the Magellanic Clouds

(赤外線観測に基づくマゼラン雲内の原始星周囲に存在する氷の研究)

氏名 下西 隆

本博士論文にまとめられている一連の研究において、私は一つの分野を切り開いた。それは、銀河系内外の様々な環境下に存在する原始星周固体物質の比較研究である。星形成、惑星形成活動はこの宇宙に無数に存在するどのような銀河においても起こりうる現象である。そしてこれらの銀河は形状、環境といった点で様々に異なる性質を持っている。よってこのような銀河の持つ性質が、その中で発生する星・惑星形成活動にどのような影響を及ぼすのかを解明する事は大変興味深い。

近年の観測技術の発達により、星間・星周環境では大部分の重元素が固体の状態が存在しているということが示唆された。これらの固体物質にはダスト(固体微粒子)のみならず、ダスト上に存在する氷も含まれている。固相における化学反応は気相におけるそれとは様々に異なる点があり、これは物質の化学的進化を考える上で大変重要なプロセスの一つである。特に氷に関しては、水・二酸化炭素、そして様々な有機分子といった生命の存在にとって重要な分子の存在形態として重要であると考えられている。しかし、宇宙空間における氷の生成・成長のメカニズムにはまだ多くの謎が残されている。

宇宙の化学的進化とは、第一次近似的には、金属量(重元素量)の進化である。よって、金属量という点において異なる環境下に存在する原始星周物質の性質を調べることは、宇宙空間における星・惑星形成の材料物質の多様性を理解する上で大変興味深い。この目的において、本研究の主要な観測対象であるマゼラン雲は大きな利点を持っている。大小マゼラン雲は天の川に最も近い矮小銀河である。大小マゼラン雲の金属量は太陽近傍の約 1/2、1/5 と低金属量であるということが知ら

れている。このようなマゼラン雲の持つ銀河環境の違いは、ダストや氷をはじめとした星周物質の化学的性質に大きな影響を与えると考えられる。

私はマゼラン雲に存在する原始星に着目し、特に氷として星周環境に存在している分子の化学状態について、天の川銀河内の原始星との比較研究を行ってきた。私は銀河の持つ環境が、星・惑星形成の材料物質の化学状態に与える影響を解明するという視点に基づき、本分野における先駆的な研究を博士論文中で行った。

まず私は赤外線天文衛星 AKARI によるマゼラン雲の近赤外分光サーベイデータを用いて、マゼラン雲内の原始星探査を行った。私はこの中で、大マゼラン雲内の約 3,000 天体の赤外線点源のスペクトルを含む近赤外スペクトルデータベースを構築した。本データベースは、以下で述べられる原始星の研究のみならず、大マゼラン雲内の様々な天体の研究において活躍が期待される有用なデータベースである。

私はこの近赤外データベースを用いて大マゼラン雲内のダストに埋もれた原始星の探査を行った。私は近赤外スペクトルの特徴に基づく新しい分類基準を用いることにより、新たに大マゼラン雲内に 7 天体のダストに埋もれた大質量の原始星を発見した。得られた近赤外スペクトルに見られる氷のフィーチャーの解析を行った結果、大マゼラン雲内の原始星周囲では二酸化炭素氷の存在比が系統的に高いということが明らかになった。ダスト上での固体分子の生成反応モデルなどを取り入れた議論により、この違いは大マゼラン雲と天の川銀河の原始星の星周環境におけるダスト温度の違いが原因であることが示唆された。本結果は、我々の住む天の川銀河とは大きく異なる環境下にある原始星は、その星周環境に存在する固体分子の化学状態が系統的に異なるということを初めて明らかにした。

次に私はさらに多くの原始星及び候補天体について AKARI を用いたより詳細な追加観測を行った。その結果、大マゼラン雲内の 20 天体の原始星について近赤外スペクトルを取得した。これらのスペクトルデータの詳細な解析により、前述の大マゼラン雲における系統的に高い二酸化炭素氷存在比が、より多くの天体サンプル、そしてより精度の良い分光データにより確認された (図 1)。さらに、原始星の Radiative Transfer モデルと多波長撮像観測データを用いた SED フィッティングにより、上述のマゼラン雲内の原始星の光度を正確に導出した。その結果、原始星の光度と氷の柱密度との間に強い相関があることを初めて明らかにした (図 2)。これは光度の高い原始星の周囲では、昇華の影響により氷が減少するというを初めて観測的に示した結果である。

さらに私は小マゼラン雲に存在する原始星についても、AKARI 衛星を用いた分光観測を行った。これにより、金属量という点で異なる 3 つの銀河にある原始星の比較研究が可能になった。大マゼ

ラン雲の原始星の観測から、高いダスト温度が二酸化炭素存在比の増加に寄与しているということが示唆された。小マゼラン雲のダスト温度は大マゼラン雲よりもさらに高い事が知られている。得られた近赤外スペクトルの解析の結果、小マゼラン雲における二酸化炭素存在比は天の川銀河よりはわずかに高いが、大マゼラン雲よりは有意に低いという事が明らかになった(図1)。これは、二酸化炭素の材料となる一酸化炭素や OH 分子が、小マゼラン雲における高すぎるダスト温度の為に昇華してしまっている事が原因であるという事が示唆された。

さらに、天の川銀河、大マゼラン雲、小マゼラン雲と異なる金属量環境下にある原始星の光度—氷柱密度関係を比べると、原始星の光度が同じであっても、銀河の金属量が低くなると星周環境の氷の量(柱密度)が減少するという事を発見した(図2)。本結果により示唆される重要な点として、小マゼラン雲よりさらに低い金属量の銀河にある原始星周囲では、氷の存在量がさらに少なくなるため、物質の化学的進化が固相での反応に依らないものになる可能性があるということである。これは物質の化学進化に大きな差異をもたらすと考えられる。

銀河系外の原始星を観測する上での大きな懸案事項の一つは、原始星の空間構造の不確定性である。銀河系内の天体と違い、遠距離に存在する銀河系外原始星は必然的により大きな空間スケールで情報を取得してしまう。これは分光観測により得られた情報がどのような領域から生じているものなのかを判断する上で大きな問題となっていた。そこで私は地上大型望遠鏡 Gemini 搭載装置 T-ReCS を用いてマゼラン雲の原始星に対して高空間分解能の中間赤外撮像、及び分光観測を行った。本観測は銀河系外の原始星に対して初めて行われた地上中間赤外観測である。この結果、これまでに観測したマゼラン雲の原始星の赤外輻射の大部分は、原始星コアのサイズに相当する非常にコンパクトな領域(~0.1 pc)から生じているということが確認された。

さらに Spitzer 望遠鏡搭載装置 IRS により取得された中間赤外スペクトルデータの解析も行った。これによりダスト及び氷の情報を含めてマゼラン雲の原始星星周物質の性質を議論する事が可能になった。解析の結果、原始星周囲に存在する氷の量は、銀河の金属量でスケールされるということが示された。

銀河系外原始星の分光的研究はここ数年で非常に大きな進歩を遂げた。本研究はその進歩に大きな貢献をした。上述の一連の研究により、まず分光的に同定された銀河系外原始星のサンプル数が大幅に増加した。そして、原始星周囲に存在する氷は、その分子存在比、量ともに異なる銀河環境下では異なる性質を示すという事が明らかになった。これらの結果は、宇宙空間における物質進化の多様性を理解する上で大変興味深い結果である。さらに、マゼラン雲の観測的利点の一つである距離の決定精度の高さに着目し、原始星の光度と氷柱密度との間に強い相関を発見した。これにより、中心星からの輻射及び銀河の環境的要因が星周環境の氷に与える影響を切り分けて考える事が

できるようになった。さらに小マゼラン雲の原始星の観測から、原始星の光度が同じであっても、銀河の金属量が低くなると星周環境の氷の量(柱密度)が減少するというを発見し、さらに銀河間での氷柱密度の違いは銀河の金属量の違いで説明できるという事を示した。

今後は、固体分子のみならず、気体分子の性質にも着目し、様々な波長域において銀河系外原始星の性質を明らかにしていく事が必要である。さらに、理論計算・実験の両面からこれまでの観測結果を再現する試みも大変興味深い。

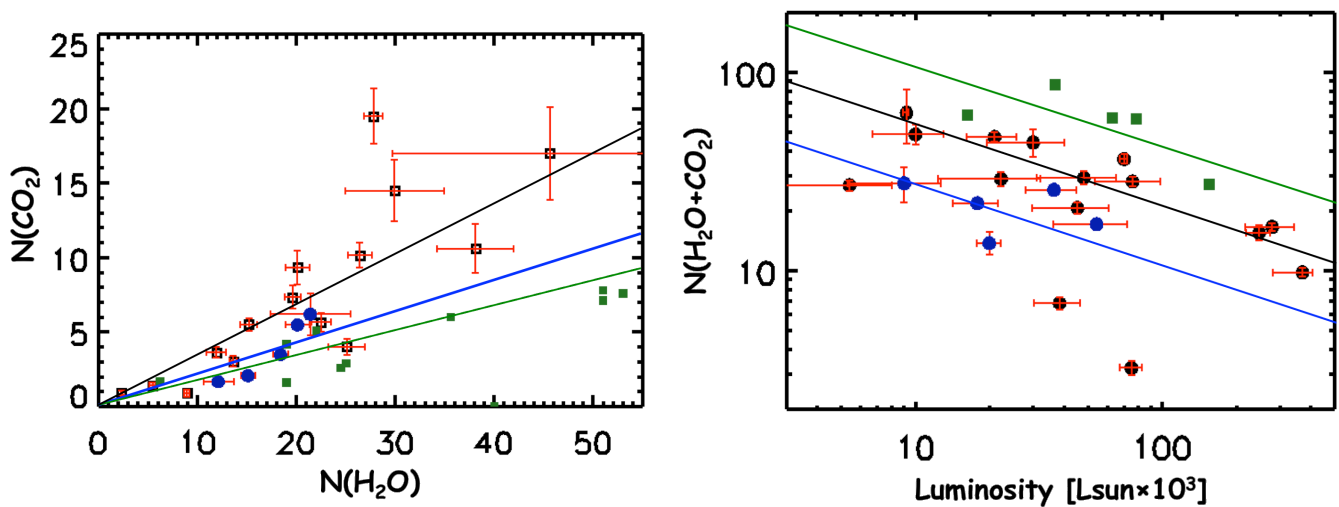


図.1 水氷 vs. 二酸化炭素氷柱密度。エラーバー付きの黒四角が大マゼラン雲、青が小マゼラン雲、緑が天の川銀河の原始星の値。各銀河における二酸化炭素氷/水氷の比は、それぞれ黒(36%, 大マゼラン雲)、青(21%, 小マゼラン雲)、緑(17%, 天の川銀河)の実線で示されており、大マゼラン雲内の原始星の星周物質は高い二酸化炭素氷比を示すことが本研究により明らかになった。これは原始星星周物質の化学状態が他の銀河では異なるという事を初めて示した結果である。

図.2 原始星光度 vs. 氷柱密度。プロットシンボルの色は図1と同じである。黒線は大マゼラン雲のデータ点に対する線形近似で、緑と青はこの線の切片を変えて小マゼラン雲、天の川銀河の点にフィットさせた線である。図から分かるように、氷柱密度と光度は強い相関を示す事が明らかになった。さらに、同程度の光度の原始星を比べると、天の川、大マゼラン雲、小マゼラン雲の順に氷柱密度が小さくなる事が明らかになった。これは星周環境における氷の量が、銀河の金属量でスケールされるという事を示している。