

論文の内容の要旨

論文題目

Physical Conditions of the Diffuse Interstellar Medium in the Active Star-Forming Carina Region

(Carina 領域の星間物質の研究)

氏名 水谷 昌彦

研究の背景

星間空間にある塵粒子から放射される連続光の強度は遠赤外域で最大になる。また、遠赤外域には気相にある多くの原子、イオンからの遷移線が観測される。したがって、星間物質の性質を研究する上では赤外線観測は極めて重要である。この波長帯では宇宙空間での吸収を受けにくく、視線上で重なりあう多くの物質からの放射を直接検出することができる。

星間ガスからの赤外輝線の解析により、電離ガスまたは中性水素ガス領域での放射機構を通じてガスの温度、密度を知ることができる。これらは星間ガスの分布状況を知るために不可欠な情報である。ガス中での励起機構の理解はこれまでの理論的研究に基づいて比較的確立されてきているが、星間物質の観測上の困難によって、星間物質の分布、または温度、圧力、化学組成の異なる相の間での相互作用については、理解されていない部分が多く残っている。また、ガス相に存在する物質の量についても得られている情報が極めて少ないことから、星間空間に見られる様々な状態の形成、進化過程を考える上で、物質からの放射を直接観測できる赤外線観測は極めて重要な役割を果たす。気相と固相(ダスト)との相互作用は、ダストの成長、破壊の条件を調べるためにも重要である。

観測内容

星間空間における加熱、冷却機構を調べるためには、温度、密度などの異なる多様なガス相を観測しなければならない。Carina 領域は、多数の大質量星とその母体である分子雲、また星周囲の電離ガスが複雑に絡みあう銀河面上の星生成領域である。この領域には高温の O3 型星が多く観測されており、銀河内部でも稀な活発な活動領域となっている。物質からの放射を測定し放射源を特定するた

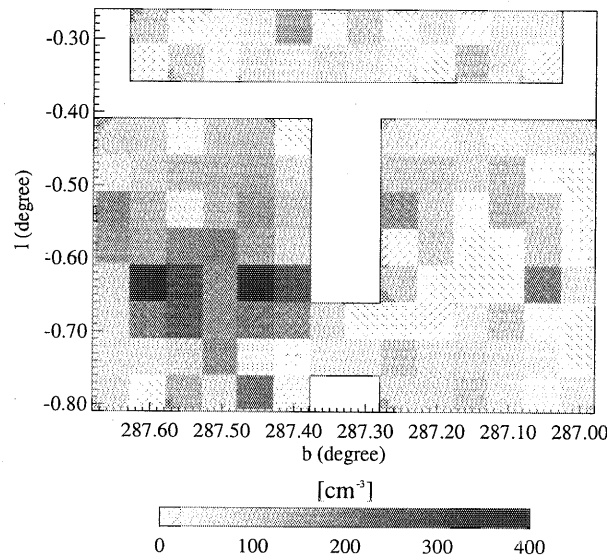


図 1: [O III] 52, 88 μm の強度比から求められる電子密度の空間分布図。観測領域全体に広がる低密度 $\sim 10 \text{ cm}^{-3}$ 電離ガスの存在を示している。

めに、電離ガスと分子雲を含む、広い ($40' \times 20'$) 領域に渡って複数の観測点を定めて遠赤外分光観測を行った。観測には、当時遠赤外域での分光が唯一可能な装置として、欧州宇宙機構 (ESA) により打ち上げられた宇宙赤天文台 ISO を利用した。これにより、45–170 μm での分光観測が可能となった。

観測の結果、各視線方向に星間空間での固体粒子の存在を示す熱的連続放射が見られた。同時に電離ガス中の遷移線 [O III] 52, 88 μm と [N II] 122 μm が観測領域全域で観測された。また、[O I] 63, 145 μm 、[C II] 158 μm 、[Si II] 35 μm も観測領域全体にわたって検出された。これはそれぞれの放射源である原子、イオンが星生成領域周囲に広く分布していることを明らかに示している。この観測は、赤外線での測定としては初めての広い範囲にわたる観測である。特に [Si II] 35 μm についてはこれまでの観測例も少なく、広がった領域からの検出は本観測によるものが初めてのことである。

考察

低密度電離ガスの検出

電離領域で、52, 88 μm に対応する励起は電子との衝突によって起こる。その励起率は電子の運動温度と密度によって決定されるが、温度への依存度が低いことから、電子密度のよい指標になる。観測されたこれらの強度比は、領域全体ではほぼ一定値であるため、一定密度の広がった O^{2+} の分布を示している。電子密度は、ライン強度比から約 10 cm^{-3} と推定される。また、この領域の熱源である O 型星近傍では $100\text{--}300 \text{ cm}^{-3}$ であることが示された。

観測の結果、可視域での観測に見られるよりもはるかに広い範囲に電離ガスが分布していることが明らかになった。これら周囲のガスを電離するために必要な光子数は、Carina 領域固有の電離領域の熱源と考えられている O 型星の集団のみから供給される量よりも多いことが分かった。これは、他の何らかの熱源からの寄与があることを示唆する。低密度の電離ガスの存在は、銀河面上での電波連

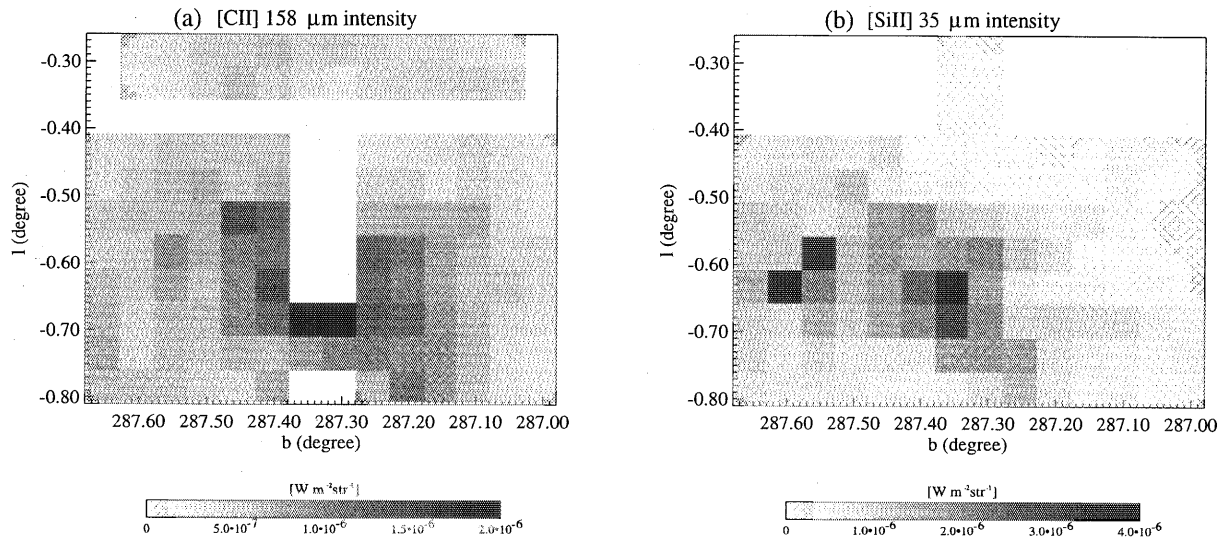


図 2: [C II] 158 μm と [Si II] 35 μm の強度マップ。観測領域全体で強い放射が見られる。[Si II] 35 μm の方が若干電離領域側 (図の左側) にシフトされた分布を示す。中央付近のピークは、光解離領域からの強い放射と考えられる。

続放射の観測からも提唱されてきた。その熱源は銀河面上に存在する O 型星であり、低密度の電離ガスは、それらに付随する電離領域が進化し重なりあった姿をとらえていると考えられる。本研究は、低密度電離領域からの放射を直接観測して、その存在を確認するとともに、定量的な議論から密度を初めて明らかにしたものである。

電離、非電離の境界領域に存在するイオン、原子の遷移線解析

H II 領域と低温の分子雲の境界領域では、照射によって分子が解離され、光解離領域と呼ばれる領域ができる。C⁺、Si⁺ など電離ポテンシャルエネルギーが水素よりも低い元素のイオンや酸素原子がこの領域に含まれる。これらの元素は、この領域の冷却に大きく寄与していると考えられている。[O I] 63, 145 μm 、[C II] 158 μm は他の電離領域や分子雲の観測でも広く検出されており、今回の観測でも強い放射が確認された。また、観測上の困難によりこれまでの観測例は極めて少ないが、[Si II] の 35 μm 輝線は光解離領域の主要な放射と考えられる。

炭素とシリコンは、星間ダストの主要な構成要素と考えられており、その強度と放射領域の特定は星間物質の進化を考える上で不可欠なものといえる。C⁺ と Si⁺ は電離ガスと中性水素ガスのどちらとも共存できることから、その遷移線の放射源を特定することは困難である。気球を使った観測によって、銀河面周辺に拡がった [C II] 158 μm 放射が観測されているが、その放射源の候補として、前述の低密度電離領域、あるいは拡がった光解離領域が挙げられている。[Si II] 35 μm は、予想よりも強い放射がスターバースト銀河や銀河中心で観測され、これらは塵同士の衝突によるダストの破壊が起こっている証拠とされている。

観測の結果、[C II] 158 μm と [O I] 63, 145 μm により相関関係が見られた。また、[Si II] 35 μm と [N II] 122 μm にも相関があることが分かった。これらは [C II] 158 μm と [Si II] 35 μm が、それぞれ主に中性水素ガスと電離ガスから放射されていることを示している。[C II] 158 μm については 70 % が中性ガスから、また [Si II] 35 μm では、90 % 以上が電離ガスからの寄与であることが分かつ

た。

測定された酸素原子の遷移線放射の強度比 ($145 \mu\text{m} / 63 \mu\text{m}$) は、比較的低密度の領域からの放射であることを示唆する。この密度領域では衝突による励起よりも UV photon による励起の効果が効いていると考えられる。ダストの連続光放射から推定される Carina 領域の放射場強度は $G_0 \sim 10^3$ であり、通常よりも高エネルギー領域であることが分かる。これらを総合して考えると、その電子密度は約 10^3cm^{-3} であることが推測される。しかしながら、観測された [C II] $158 \mu\text{m}$ と [O I] $63 \mu\text{m}$ の強度比については、先に得られた密度、輻射強度から予測される値に対して約 1/10 となっており、理論と観測との矛盾が見られた。[C II] $158 \mu\text{m}$ が相対的に強いことは、それが低密度の領域からの放射であることを示している。また、ダスト破壊による C の存在量の増加が影響している可能性もある。

通常の星間空間におけるガス成分の元素の存在量は、UV 領域での星間吸収量に基づいて推定されている。それによれば、シリコンは太陽近傍の元素存在量のうち 97.5 % がダスト中に取り込まれており、ガスとしてはほとんど観測されない。電離ガスからの放射成分として今回観測された [Si II] $35 \mu\text{m}$ 強度を説明するには、シリコンが、太陽組成の 45 % 以上は気相のイオンとして電離ガス内になくなくてはならない。これは一般の星間空間について予測されてきた値の 20 倍以上にあたり、低密度の電離領域ではダストが衝突によって破壊され、シリコンがガス相に戻っていることを示す直接的な証拠と考えられる。

結論

広い領域の分光マッピング観測で得られた放射強度の解析によって Carina 領域の星周物質の性質を調べ、以下の結論を得た。

- [O III] の輝線を拡散遠赤外光中に検出し、高励起の低密度電離ガスが銀河面上に拡がって存在することを観測的に初めて明らかにした。
- Carina 領域での拡がった [C II] $158 \mu\text{m}$ は 70 % 以上が低密度の中性領域から放射されていることを示した。
- 極めて強い [Si II] $35 \mu\text{m}$ 輝線を拡散光中に検出し、主に低密度の電離領域から生じるものであること、さらに太陽組成の 45 % 以上のシリコンがガス相にあることを示した。この結果は、電離ガス中での塵粒子の破壊が進んでいることを初めて明らかにしたものである。

元素組成は、星間物理学で解明されていない問題の一つである。以上の結果は、ダストとガスの相互作用による星間空間の構造形成を理解するための手がかりとなることが期待される。ここに挙げた結果は Carina 領域の観測に基づくものであるが、輝線が拡がった領域から観測されたものであることから、星間空間で一般的な物質の性質を示唆するものと推定される。今後、系外銀河など、さらに別の領域での観測によって確認されることが期待される。