

論文内容の要旨

論文題目 : "Distribution of Neutral Carbon Atom in Bright Rimmed Globules"

(ブライトリムを伴う分子雲における中性炭素原子の分布)

氏名 : 田中 邦彦

われわれの銀河系の体積の大部分は、異なる密度、温度および電離状態を持つ多様な層の星間物質で占められている。星間物質の諸相のうち、冷たく高密度な(温度 10 K, 密度 10^{2-7} cm^{-3})分子雲領域は星形成の母体となる領域であり、そのなかでも特に高密度な分子雲コアと呼ばれる領域に対しては、主にミリ波の分子回転輝線による観測が多く行われ、星形成過程の研究が進められてきている。その一方で、星形成にいたる前段階、すなわち希薄な原子ガス層から分子雲が形成される過程についてはより多く研究の余地が残されていると言える。

分子雲、原子ガス相において、元素としての炭素はそれぞれ C^+ イオン、一酸化炭素分子(CO)の形態をとることは観測、理論の両面から極めて確立した事実である。中性炭素原子(C^0)はその両者の遷移相をトレースすると考えられている。1990年代以降、中性炭素原子のサブミリ波帯の微細構造輝線([CI])輝線の広域観測によって、多くの分子雲における C^0 の分布が明らかにされてきたが、それらの観測の結果、分子雲に対して観測される[CI]輝線は、光解離領域(PDR)に起源を持つもののほか、分子雲の内部に分布し、化学的に非平衡な状態にある C^0 から放射されるものが存在している可能性が示唆されている。後者の C^0 成分は、分子雲形成の極めて初期に形成され、分子雲が進化するに従って減少していくと考えられている。そのため、 C^0 は分子雲形成過程の有効なプローブであると考えられている。しかし、これらの描像は未だに観測的に十分に確立されたものではない。

大質量星の周囲に形成された HII 領域の内部には、ブライトリム(Bright Rim)と呼ばれる電離された表面領域を持つ小分子雲（グロービュール）が数多く分布していることが知られている。これらのグロービュールでは電離領域のリムの背後に PDR 領域のリム構造が形成されているために、PDR 領域に存在している[CI]輝線は同様のリム構造を示す。またグロービュールは電離領域との力学的な相互作用によって、他の分子雲から孤立した比較的単純な形状を持つ。これらのことから、観測される[CI]輝線が PDR 起源か否か、その二次元分布によって容易に推定するという点で、ブライトリムを伴う分子雲は C^0 の観測による分子雲形成研究にとっては理想的なテストケースを提供しているといえる。

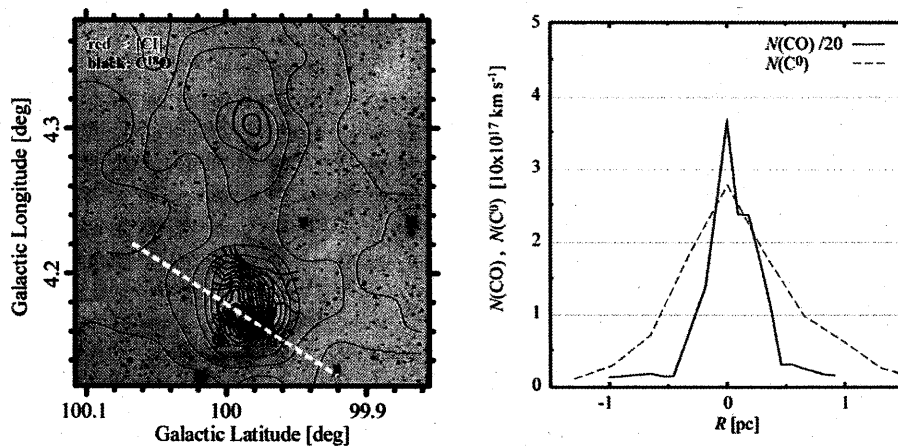
本学位論文は、多数のグロービュールのサンプルに対して[CI]輝線の観測を行い、グロービュールの進化に伴う C^0 分布および C^0/CO 比の変遷を追うことによって、分子雲中の C^0 の描像を確立することを目的とするものである。

第一の観測は、IC1396 領域に対して行われた。同領域は太陽系の比較的近傍に位置し（距離 750 px）、また多数のグロービュールを含む代表的な領域としてよく知られている。領域中の 16 のグロービュールを含む約 0.5 平方度の領域に対して、富士山頂サブミリ波望遠鏡による[CI] $^3P_1-^3P_0$ 輝線の広域観測を行った。また Patel et al. (1996)によって原始星天体を含むと同等された 5 つのグロービュールを含む 12 のグロービュールに対して、 $C^{18}O$ $J=1-0$ 、 SO $J_N=3_2-2_1$ および N_2H^+ $J=1-0$ 輝線の観測を、野辺山 45m 望遠鏡を用いて行った。

観測されたすべてのグロービュールで、[CI]輝線はブライトリムに付随したリム状分布を示さなかった。多くのグロービュールでは、 $C^{18}O$ のピークがブライトリムの背後に位置し、[CI]輝線は紫外線源に対して $C^{18}O$ ピークの更に背後か、あるいは同じ位置にピークを示すことがわかった（図 1）。また、観測されたグロービュール中でもっとも大きな質量および大きさを持つグロービュール A および E に対して、単純化した三次元 PDR モデルの予測する C^0 の柱密度と観測結果との比較を行い、望遠鏡の分解能を考慮しても、やはり[CI]のリム構造は形成されていない可能性が高いことを示した。

また、グロービュール全体で平均した C^0/CO 比は、原始星天体および N_2H^+ の輝線が検出される高密度コアの形成されているグロービュールで系統的に高い値を示すことが明らかになった。これらのグロービュール（タイプ 2）はその他のグロービュール（タイプ 1）と比較して、ビリアル質量-質量比、また内圧・外圧比の観点からみても力学的に発達していることが確認された。すなわち、力学的な進化が進んだグロービュールにおいては C^0/CO 比は小さくなっている。

C^0/CO 比と進化段階との関係は、標準的な定常 PDR モデルの観点からも解釈は可能であるが、少なくともグロービュール E においては、[CI]の二次元分布からは、PDR 起源の C^0 柱密度の密度依存性によって説明し得る可能性は否定される。より自然な解釈としては、グロービュールのコア領域に豊富に C^0 が存在し、PDR 起源の C^0 が示すであろう[CI]リム構造はこれらの付加的な成分によって“覆い隠されている”とするものである。グロービュールが力学的に進化するに従い、内部領域の C^0 は化学反応によって CO に変化し、 C^0/CO 比の低下の原因となっていると考えられる。



(図 1) IC1396 領域のグロービュールにおける、 $C^{18}O$ ($J=1-0$) 輝線、 $[CI]^3P_1-^3P_0$ 輝線の積分強度図(左)と、ストリップライン上での C^0 の柱密度($N(C^0)$)と CO の柱密度($N(CO)$)の分布(右)。ストリップラインは左の図で白い点線で示されている

第二の観測は、オリオン座の北部に位置する λ -Orionis 領域中の分子雲である B30, B35 に対して行われた。これらの分子雲はより太陽系に近く(距離 450 pc)、また、形成されている中小質量の年齢や、分子雲リングの膨張速度から推定される年齢は 4-7 Myr であり、IC1396 領域の年齢(2.5 Myr)に比べて古い。

B30, B35 分子雲に対しては、富士山頂サブミリ波望遠鏡による $[CI]^3P_1-^3P_0$ 輝線のマッピング観測、および野辺山 45m 望遠鏡による $CO J=1-0$, $^{13}CO J=1-0$, $C^{18}O J=1-0$ 輝線の観測を行い、 C^0 および CO の柱密度分布を測定した。その結果、IC1396 領域のグロービュールとは異なり、 $[CI]$ 輝線のピークは $C^{18}O$ 輝線のピークに対して紫外線源に近い点に位置していることが明らかになった。局所熱力学平衡(LTE)の仮定に基づいた解析からは、 $[CI]$ のピークが励起温度のピークではなく、 C^0 柱密度のピークによって生じていることが確認された(図 2)。

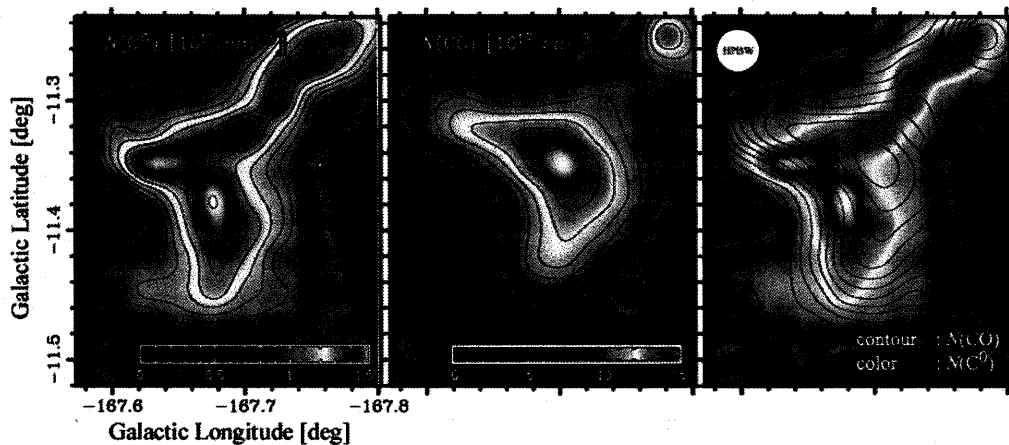
極めて理想化した分子雲の形状を仮定し、標準的な一次元 PDR モデルの結果を参照した概算では、 $[CI]$ ピーク方向で観測された C^0 の柱密度は、PDR に属する C^0 のみで十分に説明されることが示された。また分子雲表面のうち、O 型星からの強い($G_0=50$)遠紫外線の照射を受けた面のみに C^0 ピークが現れるという構造も、定常 PDR モデルから許される範囲内にあることも示された。これらの結果は、B30 および B35 分子雲においては、PDR 起源の C^0 が卓越しており、分子雲内部領域の C^0 の寄与は比較的小さいことを示している。 $[CI]$ が選択的に PDR をトレースしている領域の存在が、分子雲スケールの $[CI]$ の二次元分布に基づいて示されたことはほとんど他に例をみない。

二つの領域で観測された合計 18 個のグロービュールに対して、ビリアル質量/質量比および外圧/内圧比と、 C^0/CO 比の比較を行った(図 3)。 λ -Orionis に見られる $[CI]$ リムを伴う分子雲(タイプ 3)は、IC1396

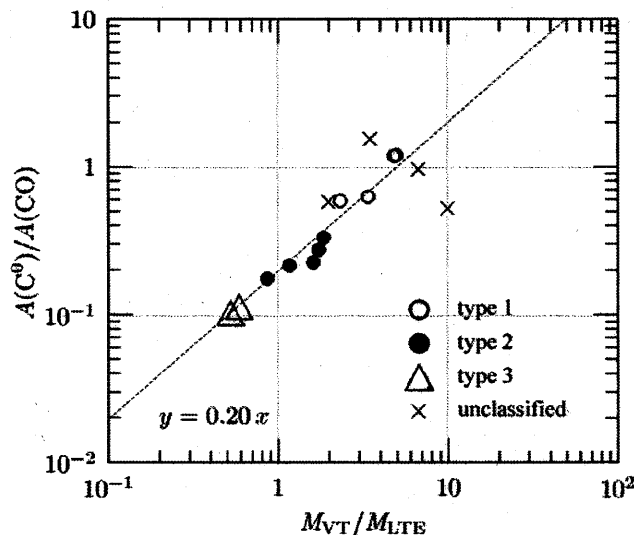
領域に属する[CII]リムを伴わない分子雲に比べて C^0/CO 比が更に低く、また力学的にもより進化の進んだ状態にある可能性がある。

したがって、 C^0 は PDR 領域と、分子雲内部の双方に分布しており、分子雲の進化に従って C^0 は以下のように分布が変遷するという描像を構築することができる。希薄な原子ガスが凝縮し、原始的な分子雲が形成された最初期の段階では、 C^0 は分子雲全体に分布し、 C^0/CO 比はきわめて高い。PDR 領域では、光解離反応と C^+ の再結合反応は急速に平衡に達しているが、分子雲内部に分布した C^0 は分子-分子間の遅い反応によって徐々に CO へと変化する。タイプ 1 と 2 に属するグロービュールはこの段階にあると考えられる。約 1 Myr の時間が経過すると分子雲内部の反応は平衡に近付き、 C^0 の量は極めて小さくなり、PDR 領域の C^0 のリム構造が卓越して観測されるようになる。タイプ 3 に属するグロービュールはこの進化過程の最終段階に近い状態にあると考えられる。

これらの一連の観測的研究によって、 C^0/CO 比、 C^0 分布の変化という観点から分子雲の形成・進化の過程に迫り得るとことが示された。



(図 2) B39 分子雲における、 C^0 の柱密度分布(左)、 CO の柱密度分布(中)および両者の比較(右)



(図 3) ビリアル質量/LTE 質量比に対する、 C^0/CO 比のプロット