

論文内容の要旨

論文題目

Structure and Evolution of Taurus Molecular Cloud as Studied by Submillimeter-Wave CI Line Observations

(サブミリ波 CI 輝線観測による牡牛座分子雲の構造と進化の研究)

氏名 前澤 裕之

星間分子雲は星形成の場である。1980年代より、様々な波長帯で星形成領域の観測が行われるようになり、星間ガスの収縮とともに原始星が形成されて、やがて主系列星に至るといふ星形成のシナリオが、観測・理論の双方から確立されてきた。これらの星の性質(質量)は、その生みの親である分子雲の性質(密度、サイズ、構造)に深く関わっていると考えられる。一方で、その分子雲の形成・進化過程については、まだほとんど理解が進んでいないのが現状である。

この状況を打開するため、我々は分子雲における炭素の存在形態に着目をした。希薄な星間雲が重力収縮して星間分子雲を形成する過程を考えた時、炭素の主要な形態は $C^+(CII)$ 、 $C^0(CI)$ 、 CO の順に変化する。従って、星間分子雲において CI と CO の分布を広く比較することで分子雲の構造や形成・進化過程にアプローチできると考えられる。 CO については、これまで国内外の研究グループが、銀河面全域にわたるサーベイ観測を活発に行っている。しかしながら CI のスペクトル線の観測は、現在 CSO の 10m 望遠鏡や $JCMT$ の 15m 望遠鏡、 AST/RO などの望遠鏡が稼働しているものの、限られた領域のみの観測にとどまっており、分子雲スケールでの広域観測は今のところほとんど行われていない。

その原因の一つとして、 CI のスペクトル線 ($^3P_1 - ^3P_0 : 492 \text{ GHz}$; $^3P_2 - ^3P_1 : 809 \text{ GHz}$) が大気吸収を受けやすいサブミリ波帯に存在するため、観測が容易ではないことがあげられる。もう一つの原因としては、ミリ波帯で使用されてきた超伝導 SIS 素子の製作が、サブミリ波帯では非常に困難であったことがあげられる。しかし最近、我々のグループの調査により、冬季の富士山頂が優れたサブミリ波観測サイトとなり得ることがわかってきた。また、これまで製作が困難であった微小面積の接合を用いたサブミリ波帯 SIS 素子が国立天文台野辺山においても作られるようになってきた。

このような背景を受け、我々は CI ($^3P_1 - ^3P_0 : 492 \text{ GHz}$; $^3P_2 - ^3P_1 : 809 \text{ GHz}$) のスペクトル線の広域観測を目的とする専用望遠鏡：富士山頂サブミリ波望遠鏡、の開発に取り組んできた。その中で、私は望遠鏡の心臓部である受信機の開発を行なった。開発した受信機は 500 GHz/345 GHz 2バンド受信機(1998年度)と 500 GHz/810 GHz/345 GHz 3バンドの受信機(1999年度)であり、いずれも実用的な性能を得た。345 GHz バ

ンド受信機は、ポインティング観測に使用する。

特に私が興味を持っている暗黒星雲からの CI 輝線は極めて微弱 (~ 2 K) であるため、受信機の性能は観測能率に大きく影響する。よって、受信機性能向上のため、素子の選定・性能評価を繰り返すとともに、各構成要素による雑音と損失の低減を図った。また、富士山頂へは冬期のアクセスが極めて難しいため、望遠鏡は完全に遠隔制御で運用する。その都合上、受信機の調整箇所は最小限におさめ、かつ安定で信頼のおける受信機システムの構築を心がけた。また 810 GHz という高周波においては、観測周波数が Nb の超伝導ギャップ周波数を超えているため、光子が Nb に吸収され、これが損失となって大幅に性能が悪化する。しかし、磁場やミキサーの温度といった周辺環境を最大限に最適化することで、Nb の素子を搭載した 810 GHz 受信器としては世界最高の感度を達成することができた。そして、1999 年の 12 月には、世界に先駆けて CI $^3P_2 - ^3P_1$ (809 GHz) スペクトル線でオリオン KL 領域のマッピング観測に成功した。

いずれの受信機も、望遠鏡搭載時には、実験室の性能よりも若干性能が下がっている。この原因としては、ミキサーの冷却温度が若干高めであること、LO パワーの調整が完全に最適化できていないこと、809 GHz ミキサーに至っては、途中のバンドパスフィルターの損失が効いていると考えられる。今後、これらを改善すれば、更に観測効率を向上できるものと思われる。

牡牛座暗黒星雲における CI 輝線の観測

開発した受信機システムを富士山頂サブミリ波望遠鏡に搭載し、1998 年の冬期から、CI $^3P_1 - ^3P_0$ 輝線 (492 GHz) で牡牛座暗黒星雲にある Heiles' Cloud 2 (HCL2) 周辺領域の広域観測を開始した。観測領域は 3.4 平方度、観測点数は 1389 点とかつてない規模に及んでいる。

その観測の結果、CI 輝線は観測領域のほぼ全域で検出された。図 1 に取得された HCL2 周辺領域の CI 輝線積分強度の分布 (カラー) と、砂田らによる $C^{18}O$ $J=1-0$ 輝線積分強度の分布 (等高線) を示す。特に HCL2 領域の南側では CI の強度が強い領域が分布しているのがわかる。この CI の分布は、大局的には ^{13}CO の分布と似ているが、細かい構造は分布が異なっている。CI と $C^{18}O$ の分布とでは、その違いがより顕著に見える。TMC-1 などの高密度分子雲コアが存在する HCL2 領域の北側では、 $C^{18}O$ が強いのに対し、南側では逆に CI が強くなっている (CI rich cloud : 図 2 では 16 の周囲)。

さらに、CI/CO 存在比を正確に評価する目的で、国立天文台野辺山の 45m 望遠鏡を用いた $C^{18}O$ と ^{13}CO の $J=1-0$ 輝線の観測を行い、26 方向について信頼おける CI/CO 存在比を導いた。CI と CO の柱密度の導出の際は、局所熱力学平衡 (local thermodynamical equilibrium : LTE) を仮定し、励起温度はすべての領域で 10 K とした。実際、 $C^{18}O$ と ^{13}CO のデータをもちいて 3 箇所 (図 2 の 17、18、19) で CO の励起温度を求めたところ、10.1 K-10.3 K という値を得たため、10 K の仮定は基本的に妥当であると考えている。結果を図 2 においてカラーのイメージで示した。これにより HCL2 領域か

ら東の方向に伸びた領域で系統的に CI/CO 比が高く、HCL2 領域の北側では CI/CO 比が明らかに低い (~ 0.1) ことがわかった。

さらに、CI の分布と物質の分布の関係を比較するため、IRAS による $100 \mu\text{m}$ と $60 \mu\text{m}$ のサーベイデータから我々の CI 観測領域全域の可視減光量 (ダストの柱密度) を求めた。これから、HCL2 領域の東側に広がった領域は 1 等から 4 等程度の translucent cloud (希薄な雲) であることが明らかになった。この領域の CI の柱密度や CI/CO 比は星間紫外光による光解離を考慮した理論モデル (Photodissociation Region (PDR) モデル) で説明できる。このことは translucent cloud では星間紫外光が入り込みやすく、その結果、雲の内部にも CI が存在していることを意味する。一方、高密度分子雲コアが数多く存在する HCL2 領域の北側では、CI は主に PDR 層 (星間紫外光に照らされた分子雲の表面) に分布していると推察される。

一方、CI rich cloud (図 2 の 16 周辺) では、CI/CO 比は 0.2-0.7 の値をとる。特に、CI の強度が最も強いところでは、CI/CO 比は 0.7 以上をとる。図 3 が示すように、CI rich cloud では、ある程度の CO と可視減光が存在しつつ、かつ CI が豊富に存在している。したがって、CI rich cloud は空間的な意味も含めて translucent cloud と高密度分子雲コア領域の間にある領域として特徴付けることができる。このような領域は、もはや単純な PDR モデルでは説明できない。また、CI の分布と IRAS 点源や T-Tauri star などの原始星候補天体の分布には有意な相関が見られないため、それらの天体が CI rich cloud の形成に関係しているとは考えにくい。

私は、CI rich cloud が高密度分子雲コアと同程度の質量を有することや、図 3 を考慮して、CI rich cloud は、まさに分子雲から高密度分子雲コアが形成される途中の様子を捉えているのではないかと考えている。実際、数値化学モデル計算によると、CI が CO へと固定する化学進化の時間スケールと雲の力学的な時間スケールは同程度であることが示される。CI rich cloud 内における高い CI の柱密度や CI/CO 比のばらつきは、その時間の効果でおおよそ説明ができる。CI rich cloud が分子雲コアの形成過程の中で若い段階にあるとすると、HCL2 領域では、現在、北 (高密度分子雲コア領域) から南 (CI rich cloud) へと分子雲の進化・形成が進みつつあると考えられる。なお、CI rich cloud が、我々の観測では分解できないクランプ構造からなっており、それぞれのクランプの表面が星間紫外光で光解離され CI で光って見えているという可能性も考えられる。ただし translucent cloud、CI rich cloud、高密度分子雲コアに対して得られた CI/CO 比の違いが、クランプ構造の数やサイズの違いによるものかどうか疑問は残る。現時点では、CI rich cloud は、高密度分子雲コアに至る途中の段階にある若い分子雲か、場合によっては clump 構造が卓越した領域、もしくはそれらの両方の効果が効いている領域であると考えている。

本研究で確立した分子雲スケールでの CI 広域観測は、分子雲の進化過程や構造を理解するための重要な指針を与えることを明らかにした。

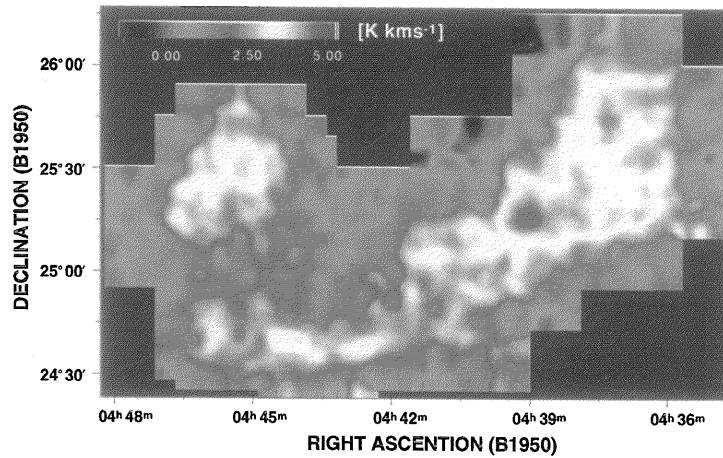


図 1. CI の積分強度図 (カラー)。等高線は国立天文台野辺山の 45m 望遠鏡で観測された $C^{18}O$ ($J=1-0$) の積分強度図 (Sunada & Kitamura 2001)。HCL2 領域は、図の RIGHT ASCENSION でほぼ 04^h40^m - 04^h35^m の間に分布しているガスの領域をさす。(東が左に対応する。)

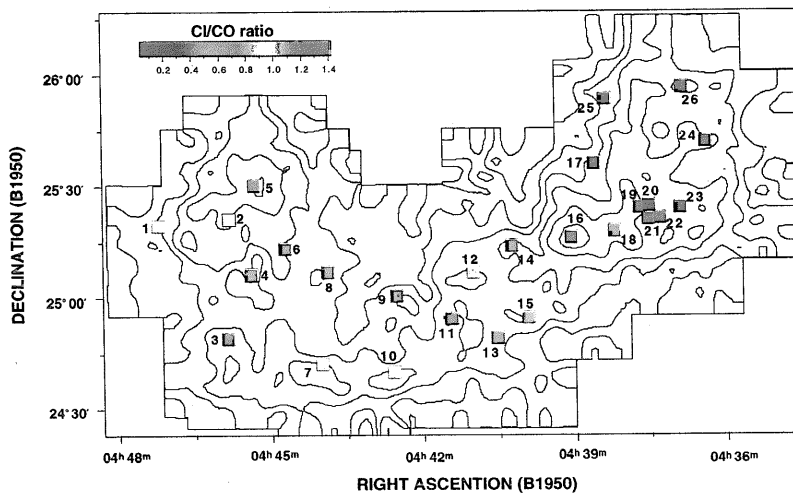


図 2. 26 点において、CI/CO 比をカラーでイメージ化したもの。CI/CO 比が 1 以上の領域は赤味がかかった色、0.2 以下の領域は紫色に対応している。

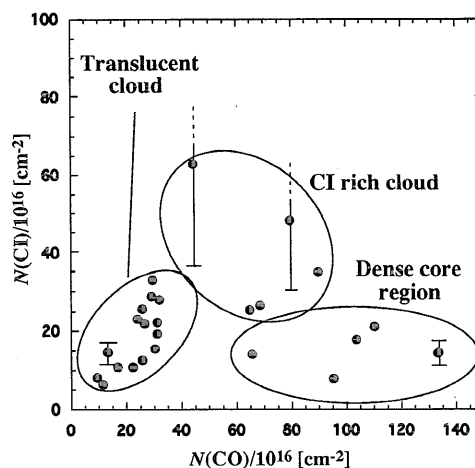


図 3. translucent cloud (希薄なガス)、CI rich cloud、dense core regions (高密度分子雲コア領域) における CI と CO の柱密度の関係。