

論文内容の要旨

論文題目 : Atomic Carbon in Molecular Clouds Interacting with
Expanding HII Regions

(膨張する HII 領域と相互作用した分子雲における中性炭
素原子)

氏名 酒井剛

大質量星は、星風や超新星爆発などにより星間空間に大きなエネルギーを放出し、周りの星間物質に大きな影響を与える。大質量星は、大きな質量をもつ分子雲（巨大分子雲）で生まれ、質量の小さな分子雲（暗黒星雲）では形成されないと考えられている。さらに、大質量星は、巨大分子雲の高密度かつ大質量なコアにおいて、小質量星のクラスターとともに形成されると考えられている。しかし、小質量星の形成メカニズムが比較的理解されているのに比べ、大質量星の形成メカニズムは余りよくわかっていない。大質量星は大質量なコアでのみ形成されるから、大質量なコアの形成過程、進化を詳しく調べることは、大質量星の形成を考える上でも非常に重要である。

大質量なコアを形成するメカニズムとして、HII 領域と分子雲との相互作用は非常に重要であると考えられている。HII 領域の膨張によって、周りの分子雲を圧縮するためである。我々は、その過程を理解する上で、中性炭素原子の C I 輝線の観測が有効であると考えている。

星間空間において炭素は主に3つの形態で存在する。希薄な領域では、星間紫外線によりイオン化され炭素イオン(C⁺)が主要な存在形態である。一方、分子雲内部では、ダストによって紫外線が吸収されるため一酸化炭素(CO)が主要な存在形態となる。残りの一つが中性炭素原子(C⁰)である。C⁰はC⁺とCOの中間の領域に存在すると考えられている。たとえば、紫外線のあたる分子雲表面ではC⁺が主要な存在形態であり、分子雲内部へ行くに従ってC⁰からCOへと主要な存在形態が変化していくと考えられている。この紫外線に照射された分子雲表面は、光解離領域(Photodissociation region; PDR)と呼ぶ。これまで、C⁰は、分子雲表面のPDRに主に存在すると考えられてきた。しかし、近年の[CI]輝線の観測の結果、分子雲におけるC⁰の起源として、単純に分子雲表面にのみ存在するのではなく、分子雲の構造や、化学進化といった要素が大きく関係しているのではないかということが指摘されている。分子雲におけるC⁰起源が、分子雲の構造や化学組成に起因するとすれば、その起源を探ることは、分子雲の構造、化学組成といった観点から、分子雲そのものの進化について探求することにつながると期待される。この性質を考慮して、HII領域と分子雲との相互作用の様子が見られているW3/W4/W5領域に対して[CI]輝線の観測を行った。

W3巨大分子雲において、活発な星形成は分子雲西側の領域でのみ起こっている。この領域はW4巨大HII領域の膨張によって圧縮され形成されたと考えられており、High Density Layer (HDL)と呼ばれている。このHDLには、主に3つの星形成領域があることが知られている。非常に活発な星形成を伴うW3(Main)、次に活発なW3(OH)領域、さらにあまり活発でないAFGL 333領域の3つである。富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた[CI] $^3P_1-^3P_0$ 輝線、 $^{12}\text{CO } J=3-2$ 輝線の観測の結果、AFGL 333領域において、 $^{12}\text{CO } J=3-2$ 輝線が非常に弱いにもかかわらず、[CI] $^3P_1-^3P_0$ 輝線が非常に強いことがわかった(図1参照)。さらに、AFGL 333領域の[CI]輝線のピーク強度はW3領域内で最も強いこともわかった。

この[CI]輝線の起源を詳しく調べるために、AFGL 333領域とW3(OH)領域に対して、野辺山4.5m望遠鏡を用い、 $^{12}\text{CO } J=1-0$ 、 $^{13}\text{CO } J=1-0$ 、 $\text{C}^{18}\text{O } J=1-0$ 輝線の観測を行った。[CI]輝線とCO輝線を比較した結果、[CI] $^3P_1-^3P_0$ 輝線の強度と $^{13}\text{CO } J=1-0$ 輝線の強度は非常によく相関することがわかった。さらに柱密度を比較するとC⁰の柱密度はCOの柱密度に対し、 A_V が30等程度まで単調増加することがわかった。また、IRAS 100 μm と60 μm のデータから紫外線強度を見積もった結果、AFGL 333領域では、W3(OH)やW3(Main)に比べ有意に低い値を示した。これらの結果は、C⁰が分子雲表面のPDRにのみにあるとする考え方では説明できず、C⁰の起源に分子雲の構造や化学組成が関係していることを強く示唆

する結果である。

さらに我々は、AFGL 333 領域において、2つの $C^{18}O$ コアを同定した。これらのコアについてさらに詳しく見るために、近赤外と中間赤外のデータと $C^{18}O$ のデータを比較した結果、これらのコアではまだ、活発な星形成が起こっていないことがわかった。これらのコアの LTE 質量を求めた結果、それぞれ、 $2.6-3.2 \times 10^3 M_{solar}$, $1.7-2.0 \times 10^3 M_{solar}$ であり、大質量星が形成されているコアと同程度の質量を持つことがわかった。さらに、Virial 質量は LTE 質量の 3 分の 1 程度であり、これからこのコアで星形成が起こる可能性を示している。このような大質量かつ星形成の起こっていない分子雲コアはこれまであまり見つかっていなく大質量星の形成を考える上で非常に貴重なサンプルであるとともに、この領域が大質量星形成のかなり初期の段階にあることを示している。我々はさらに、このコアの性質を詳しく調べるため野辺山 45 m 望遠鏡を用い、 NH_3 (1, 1)、(2, 2) 輝線の観測を行った。その結果、これらのコアが活発な星形成を伴うコアに比べ有意に低温であり、線幅が狭いことがわかった。

我々は、さらに AFGL 333 領域における強い [CI] 輝線の起源を詳しく調べるため、W 3 巨大分子雲にあるいくつかの大質量コア (W 3 West, W 3 East, W 3 SE, W 3(OH) A, AFGL 333 Core A, AFGL 333 Core B) に対して様々な分子輝線 ($CCS J_N=4_3-3_2$, $HC_3N J=5-4$, $H^{13}CO^+ J=1-0$, $HN^{13}C J=1-0$, $CCH N=1-0$, $N_2H^+ J=1-0$) の観測を行った。その結果、AFGL 333 領域でのみ CCS 輝線を検出することができた。CCS は化学進化段階の初期に豊富に存在すると考えられている分子である。さらに、AFGL 333 領域に対して、 $N_2H^+ J=1-0$, $HC_3N J=5-4$, $CCS J_N=4_3-3_2$ 輝線のマッピングを行った。その結果、それぞれ異なる分布を示した。 N_2H^+ と $C^{18}O$ 輝線に比べ、 HC_3N , CCS 輝線は南側で広く分布していた。さらに、CCS 輝線の分布は [CI] 輝線の分布と比較的似ていることがわかった。また、CCS と N_2H^+ の柱密度比を求めると、W 3(OH) に比べ AFGL 333 領域では有意に高いことがわかった。CCS と N_2H^+ の柱密度比は化学進化の指標となると考えられており、この結果は、AFGL 333 領域が他の領域に比べ化学的に若い可能性を示唆している。このことは、AFGL 333 領域においてまだ活発な星形成が起こっていないことと矛盾しない。さらに、CCH 輝線のプロファイルと $C^{18}O$ 輝線のプロファイルを比較したところそれらは非常によく似ていることがわかった。モデル計算において CCH と C^0 はよく似た振る舞いを示す。定常状態において CCH は C^0 と同様に分子雲表面に主に存在する。一方、化学進化の初期段階においては分子雲内部に豊富に存在する。したがって、CCH 輝線の起源を考えることは [CI] 輝線の起源を考えることと関係していると考えられる。 $C^{18}O$ 輝線は光学的に薄いため、質量の大きな分子雲内部の高密度領

域を主にトレースする。したがって、CCH 輝線のプロフィールと $C^{18}O$ 輝線のプロフィールが似ているということは、CCH 輝線の起源が分子雲のより内部からであり、化学進化の初期段階にある可能性を示唆している。これらの結果は、[CI]輝線の起源が化学進化の若い段階にあることと矛盾せず、AFGL 333 領域における C^0 輝線の起源が化学的に若いことによる可能性を示唆している。

さらに W3/W4/W5 領域に[CI] $^3P_1-^3P_0$ 輝線の観測を広げた。その結果、すべての領域において $^{13}CO J=1-0$ との比較的良好な相関が見られた。また、AFGL 333 領域における W 3 領域において HDL の西側に広がった希薄な領域との $N(C^0)/N(CO)$ 比を比較したところ、大きな違いは見られなかった。[CI]輝線の起源が、分子雲の構造のみにあるとすると、AFGL 333 領域は圧縮の影響を受けているにもかかわらず、影響を受けていない領域と構造があまり変わらないことになってしまう。したがって、AFGL 333 領域の[CI]輝線の起源として化学進化が大きく関わっているのではないかと考えられる。つまり、分子雲が HII 領域の膨張によって圧縮されることにより、分子雲内部に紫外線が届かなくなり、 C^+ が C^0 へと変化する。この C^0 は $\sim 10^6$ yr 程度の時間をかけてゆっくりと CO へと変化していく。W 4 HII 領域の膨張シェルタイムスケールは 2×10^6 yr 程度と見積もられており、化学進化のタイムスケールと大きな矛盾はない。したがって、HII 領域の膨張によって圧縮された分子雲は化学組成の若い段階を経て、星形成へと進んでいくことを示唆している。

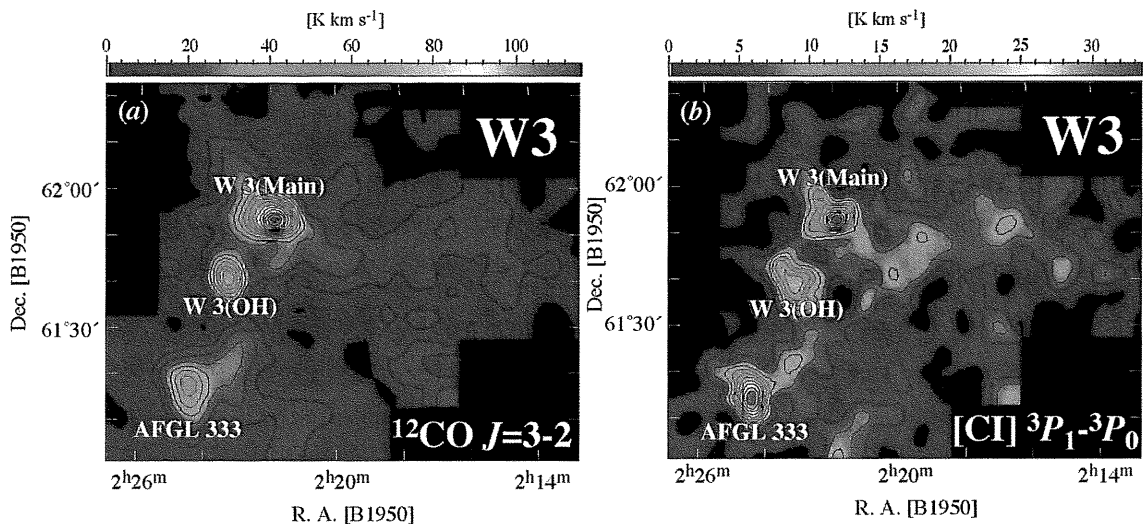


図 1. W 3 巨大分子雲の $^{12}CO J=3-2$ 輝線と [CI] $^3P_1-^3P_0$ 輝線の積分強度図。