

氏 名 有 川 裕 司

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第454号

学位授与の日付 平成12年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 天文科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Submillimeter-wave Observations of the Shocked
Molecular Gas Associated with Supernova Remnants

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 石黒 正人
助 教 授 立松 健一
助 教 授 出口 修至
助 教 授 渡部 潤一
助 教 授 長谷川 哲夫 (東京大学)

論文内容の要旨

Submillimeter-wave Observations of the Shocked Molecular Gas Associated with Supernova Remnants

Supernova remnants (SNRs), which are very energetic objects, are thought to have great influence on the interstellar medium. The expanding shock waves of SNRs compress, heat, and accelerate the interstellar gas. Because the interaction of SNR with the molecular cloud may play an important role in the next-generation star formation, it is of considerable interest to study the physical and chemical processes of the interaction.

In order to search for the interaction between SNR and the molecular cloud, we observed two SNRs, W28 and γ Cygni SNR, which are supposed to be EGRET gamma-ray sources, in submillimeter-wave CO(J=3-2) line (345 GHz ; 0.9 mm) by using the 15 m James Clerk Maxwell Telescope (JCMT). In W28, we detected a broad emission (maximum linewidth reaches $\Delta V \sim 70 \text{ km s}^{-1}$), which suggests an interaction between SNR and the molecular cloud ("shocked gas"), as well as a narrow emission from the "unshocked gas". However, the broad emission was not observed toward γ Cygni SNR.

For W28, the distribution of the CO gas is similar to that of the 327 MHz radio-continuum emission, and tends to be stronger along the radio-continuum ridge. This suggests that the compression of magnetic fields in the SNR by the cloud results in enhanced synchrotron radiation. In addition, all of the OH (1720 MHz) maser spots, which trace the interaction between SNR and the molecular cloud, are located along the filament of the shocked gas. These facts convincingly indicate that SNR W28 interacts with the molecular cloud. Our observations are consistent with a hypothesis that the interaction of the SNR with the molecular cloud can be the origin of gamma-rays. Moreover, the distribution of the unshocked and shocked gas is clearly resolved. The shocked gas is filamentary, and surrounds the center of the supernova explosion. The unshocked gas is displaced by 0.4 - 1.0 pc outward with respect to the shocked gas. The spatial relationship between shocked and unshocked gas has been clarified for the first time for the interaction between SNRs and molecular clouds.

In order to obtain the distribution of the cold gas and the physical properties of the molecular gas associated with W28, we observed the millimeter-wave CO(J=1-0) line (115 GHz ; 2.6 mm) by using the 45 m telescope of the Nobeyama Radio Observatory (NRO). It is found that the line intensity of CO(J=1-0) emission is stronger than that of CO(J=3-2) emission in the narrow component, and while the CO(J=3-2) emission is stronger than CO(J=1-0)

emission in the broad component. The distribution of CO(J=1-0) globally resembles that of CO(J=3-2). The unshocked gas has a gas kinetic temperature of $T_{\text{kin}} \sim 20$ K and a density of $n(\text{H}_2) \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$, and a total mass of $M_{\text{unshocked}} = 4 \times 10^3 M_{\odot}$. On the other hand, the shocked gas has $T_{\text{kin}} > 60$ K, $n(\text{H}_2) > 10^4 \text{ cm}^{-3}$, and $M_{\text{shocked}} = 2 \times 10^3 M_{\odot}$. The total kinetic energy deposited in the shocked molecular gas is 3×10^{48} erg, which corresponds to 0.3 % of the energy of the supernova explosion.

To understand the chemistry related to carbon in the interaction region between SNR and the molecular cloud, we observed in CO(J=3-2) at 345 GHz (0.9 mm) and Cl($^3\text{P}_1$ - $^3\text{P}_0$) at 492 GHz (0.6 mm) toward the four SNRs, W28, IC 443, W44, and W51C by using the Mt. Fuji submillimeter-wave telescope, which we developed. This telescope is the first submillimeter-wave telescope in Japan. With this telescope, we can observe Cl($^3\text{P}_1$ - $^3\text{P}_0$) and CO(J=3-2) simultaneously. The spatial resolution is suitable for the observation of the molecular cloud scale. Except for IC 443, the Cl($^3\text{P}_1$ - $^3\text{P}_0$) emission was detected. We found that the distribution of the Cl($^3\text{P}_1$ - $^3\text{P}_0$) emission is similar to that of the CO(J=3-2) emission. It is clear that the known OH (1720 MHz) maser spots are located at the edge of clumps in all 4 SNRs. In the interaction region between SNR and the molecular cloud, the Cl($^3\text{P}_1$ - $^3\text{P}_0$)/CO(J=3-2) peak intensity ratio and the N(Cl)/N(CO) column density ratio tend to be high. On the other hand, in molecular clouds unrelated with SNR, the ratios are lower. This result might imply that the interaction of SNR with the molecular cloud enhances the Cl abundance.

At present, though 220 SNRs are cataloged in our Galaxy, the observational examples of the interaction between SNR and molecular clouds are small in number. The shock region in W28 has rather simple structure and "edge-on". In the future, W28 can be one of the best regions for detailed studies of the interaction between SNR and the molecular cloud. By increasing the number of the observational examples, we can obtain better understanding of the molecular cloud associated with SNR.

申請者は、サブミリ波（波長1ミリ以下の電波）の観測をもとにして、「超新星残骸」（星の一生の最後の大爆発である超新星爆発に起因する星雲）が「星間分子雲」（星の誕生の場）を加速・圧縮している現場（相互作用領域）の観測的研究を行い、相互作用領域の空間構造を世界で初めて観測的に明らかにするなどの成果をあげた。

本研究で得られた成果は以下のとおりである。

(1) 申請者は、サブミリ波で超新星残骸W28を観測することにより、この超新星残骸と付属する分子雲の相互作用領域の構造をはじめ観測的に明らかにした。観測データは、ハワイのマウナケア山頂（標高4200m）にあるサブミリ波望遠鏡ジェームズ・クラーク・マクスウェル望遠鏡（JCMT）で取得された。星間分子雲の圧縮は、重力不安定性を介して次世代の星の誕生に結びつく可能性が高く、「宇宙における輪廻」の解明への一端につながる重要な研究結果といえる。超新星残骸W28では、スペクトル線幅の狭い静かなガスと線幅の広い激しい運動を示すガスが、空間的に約1パーセク（3光年）も系統的にずれていることが発見された。このような大きなずれは、理論的に予想されておらず、超新星残骸と分子雲の相互作用の理論的研究に与えるインパクトは非常に大きい。相互作用領域では、(A) 電波連続波（シンクロトロン放射）の強度が強くなっていること、(B) OH分子からのメーザー（電波でのレーザー）放射があること、(C) 高エネルギーγ線（ $> 100 \text{ MeV}$ ）が出されていること、がこれまでにない確からしきで示され、超新星残骸－星間分子雲の相互作用がこれらの事象の原因となっていることがわかった。また、同じ分子雲に対して野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡を用いて、ミリ波の電波観測を行った。得られたミリ波データとサブミリ波のデータと併せて、加速・圧縮されたガスの物理量を決定した。

(2) 富士山頂サブミリ波望遠鏡を用いた超新星残骸と分子雲の相互作用のサーベイ観測。サブミリ波の中世炭素原子（CI）と一酸化炭素分子（CO $J=3-2$ ）の2輝線を観測した結果、分子雲と相互作用していることが確からしい3つの超新星残骸W28、W44、W51Cの相互作用領域で、CI/CO（ $J=3-2$ ）の輝線強度比が系統的に高くなっていることが見出された。一つの解釈として中性炭素原子（CI）の存在量が高くなっていることが考えられる。CIの存在量増加は、これまで1例の超新星残骸IC443でしか知られていなかったが、申請者の研究でそれが特殊な場合でなく、より一般的な現象である可能性があることがわかってきた。超新星残骸が分子雲に与える化学的影響を探る上で極めて興味深い観測結果である。

(3) 富士山頂サブミリ波望遠鏡の開発、特に遠隔制御観測ソフトウェアの開発。サブミリ波は、大気中の水蒸気の吸収を強く受けるために、標高3000m以上の高地での観測が必須である。(1)で示されるように、サブミリ波観測は天文学における重要な観測的ツールと期待される。日本にはこれまでサブミリ波望遠鏡がなかったが、その重要性を鑑み、東京大学初期宇宙研究センター、分子科学研究所、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の共同で1995年より富士山頂サブミリ波望遠鏡の設計・製作を開始した。申請者は、当初よりその主要開発メンバーであり、観測制御プログラムを中心となって書き上げた。望遠鏡は、1998年9月より山頂で順調に観測を開始して、着実に成果を上げている。

サブミリ波観測が可能な冬期、富士山頂はアクセス不可能であり、申請者の遠隔制御・モニターシステムが非常に高い信頼性で動作したことは、本望遠鏡の成功に大きく貢献している。

申請者の研究結果は、十分な独自性を持ったものとして高く評価できる。天文学の基本的な問題の探求におけるサブミリ波天文学の有効性を強くアピールするものである。また、申請者自身がサブミリ波の観測装置の開発を進めたことも、高く評価される。